

**DANIEL ALEJANDRO TAMAYO SALAZAR**

**CODIGO: 201516751114**

**Asesor: Ing.,M.Sc. ALEJANDRO VELÁSQUEZ LÓPEZ**  
**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DE DISEÑO - GRID**

**UNIVERSIDAD EAFIT**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA – MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN**  
**MEDELLIN 2015**

# **AGRADECIMIENTOS**

Después de todos estos años de estudio y esfuerzo, existen muchas personas con las que me encuentro enormemente agradecido, por su apoyo no solo en cuestiones académicas sino también en mi vida personal.

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, por el apoyo y la motivación brindada en estos años, quiero agradecerles por estar a mi lado de manera incondicional sin importar las circunstancias y por haber dado siempre su mayor esfuerzo para que nunca me faltara nada, y porque mi única preocupación y responsabilidad fueran mis estudios. A mi madre quiero agradecerle por sus consejos y por su disposición para escucharme siempre que fuera necesario. A mi padre le agradezco que siempre estuvo para mí cuando necesite de algún favor, desde ayudarme en alguno de mis proyectos, hasta llevarme y recogerme en la universidad cada que fuera necesario.

Quiero agradecerle al profesor Alejandro Velásquez López, primero que todo por haberme brindado más que una relación de profesor alumno, una amistad y por haber creído siempre en mis cualidades. Quiero agradecerle también por su asesoría, ya que con sus amplios conocimientos en áreas como la mecánica y la electrónica, fue una persona indispensable para el desarrollo de este proyecto. Le agradezco al profesor Alejandro por su asesoría tanto a nivel académico como profesional.

Gracias a mis compañeros Alejandro Mesa Tabares por el trabajo conjunto en el desarrollo del banco y la realización de pruebas, y a mis compañeros Sebastián Amaya y David Velásquez ya que con su gran conocimiento en electrónica fueron de gran ayuda para el proyecto.

Finalmente agradezco a Natalia Ramírez, la persona que me brindo un inmenso cariño durante todos mis años de estudio y fue totalmente incondicional en todos los aspectos.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	viii
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>ix</b>
OBJETIVOS .....	xiv
ALCANCE .....	xiv
PALABRAS CLAVE.....	xv
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
1.1 Clarificación de la tarea.....	32
1.2 Diseño conceptual.....	32
1.3 Corporificación y diseño de detalle .....	34
1.4 Pruebas y validación del prototipo .....	35
1.5 Validación de la electrónica y prueba de control de altura .....	40
<b>2. RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
2.1 Clarificación de la tarea.....	43
2.2 Diseño conceptual.....	44
2.3 Corporificación y diseño de detalle .....	56
2.4 Pruebas y validación del prototipo .....	74
2.5 Validación de la electrónica y prueba de control de altura .....	79
<b>3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
3.1 Clarificación de la tarea.....	84

3.2	Diseño conceptual.....	84
3.3	Pruebas y validación del prototipo .....	85
3.4	Validación de la electrónica y prueba de control de altura .....	86
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>88</b>
5.	TRABAJO FUTURO.....	90
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>117</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Inversión del (DoD) de EEUU para el desarrollo de drones. ....	ix
Figura 2. Grados de libertad de un multirrotor. ....	xii
Figura 3. Parrot AR.Drone 2.0. ....	xvii
Figura 4. Cuadricóptero DJI Phantom 1. ....	xviii
Figura 5. Octorrotor DJI S1000. ....	xix
Figura 6. Pares cinemáticos y sus grados de libertad. ....	xxii
Figura 7. Plataforma de Stewart. ....	xxiii
Figura 8. DJI Inspire 1 Quadcopter. ....	xxiv
Figura 9. Prueba de arrastre de motores. ....	xxiv
Figura 10. Medición de fuerza de propulsión para cuadricópteros. ....	xxv
Figura 11. Pruebas de actitud con 3 grados de libertad. ....	xxvii
Figura 12. Banco Quanser 3 DOF hover. ....	xxviii
Figura 13. Banco Quanser helicopter 3 DOF. ....	xxix
Figura 14. Metodología de diseño según Pahl y Beitz. ....	31
Figura 15. Sistema de bloqueo de rotación. ....	36
Figura 16. Configuración de motores, fuente y fusibles. ....	37
Figura 17. Bloqueo de desplazamiento vertical. ....	38
Figura 18. Banco de pruebas en posición horizontal. ....	39
Figura 19. Esquema de un control PID. ....	41
Figura 20. Caja negra del banco de pruebas. ....	44
Figura 21. Estructura Funcional del banco de pruebas. ....	45
Figura 22. Matriz morfológica. ....	47
Figura 23. Opción de diseño 1. ....	49
Figura 24. Opción de diseño 2. ....	51
Figura 25. Alternativa de diseño 3. ....	52
Figura 26. Diseño final del banco de pruebas. ....	57
Figura 27. Sistema de movimiento vertical (V.Z._). ....	58
Figura 28. Sistema de bloqueo de rotación <i>Pitch/Roll</i> . ....	59

Figura 29. Sistema de rotación (V._.P / V._.R).....	60
Figura 30. Desplazamiento Horizontal (H.X._ / H.X.P).....	61
Figura 31. Posicionamiento del banco para vuelo horizontal. ....	62
Figura 32. Sistema de limitación de rotación.....	63
Figura 33. Sistema de bloqueo de desplazamiento.....	64
Figura 34. Malla de protección. ....	65
Figura 35. Fuente de computador de 12V y 18A.....	67
Figura 36.Sensor de ultrasonido PARALLAX Ping.....	68
Figura 37. Unidad de medición inercial ArduIMU V3.....	69
Figura 38. Ubicación de la Unidad de medición inercial (IMU). ....	70
Figura 39. Sensor infrarrojo SHARP GP2Y0A02YK.....	70
Figura 40. Medidas de altura con ambos sensores sobre acrílico blanco. ....	71
Figura 41. Medidas de altura con ambos sensores sobre madera.....	72
Figura 42. Prototipo real del banco de pruebas.....	74
Figura 43. Prueba de vuelo vertical con bloqueos de rotación. ....	76
Figura 44.Banco con bloqueo para desplazamiento vertical. ....	77
Figura 45. Banco de pruebas en posición horizontal.....	78
Figura 46. Prueba de altura controlada por PID y PID con anti-windup. ....	80
Figura 47. Control PID de altura sin Anti-Windup.....	81
Figura 48. Control PID de altura con Anti-Windup.....	82
Figura 49. Caracterización de motores. ....	114
Figura 50. Fuerza de arrastre generada en función de la señal de servo. ....	115

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Palabras calve.....	xv
Tabla 2. Composición de alternativa de diseño 1.....	48
Tabla 3. Composición de alternativa de diseño 2.....	50
Tabla 4. Composición de alternativa de diseño 3.....	52
Tabla 5. Combinaciones posibles de movimientos y sus DOF's. ....	56

# RESUMEN

En el siguiente trabajo se presenta el proceso de diseño y construcción de un banco de pruebas para productos multirrotores, con el fin de facilitar el diseño y pruebas de los mismos, limitando el movimiento de estos mediante restricciones mecánicas, con el fin de disminuir los riesgos físicos tanto de las personas que realizan las pruebas, como de los equipos que generalmente tienen un alto valor económico. Así mismo para facilitar el aprendizaje del comportamiento de estos productos mediante un acercamiento progresivo en complejidad.

De acuerdo a lo anterior se diseñó un banco de ensayos, en el que fuera posible realizar pruebas de actitud y desplazamiento para cada uno de los grados de libertad de un multirrotor. Este banco, ofrece al usuario la posibilidad de realizar diferentes montajes, con el fin de probar cada uno de los grados de libertad del vehículo, bien sea de forma individual o mediante combinaciones de estos, lo que permite a los diseñadores desarrollar diferentes estrategias de control y realizar tanto pruebas como ajustes a las mismas, permitiéndoles así lograr un control óptimo del multirrotor.

Para lograr el objetivo propuesto, los diferentes grados de libertad del multirrotor se limitaron mediante restricciones mecánicas como guías lineales, pines, rodamientos, etc. Y se realizó la instrumentación del banco con distintos sensores e instrumentos de medición para la retroalimentación de las estrategias de control.

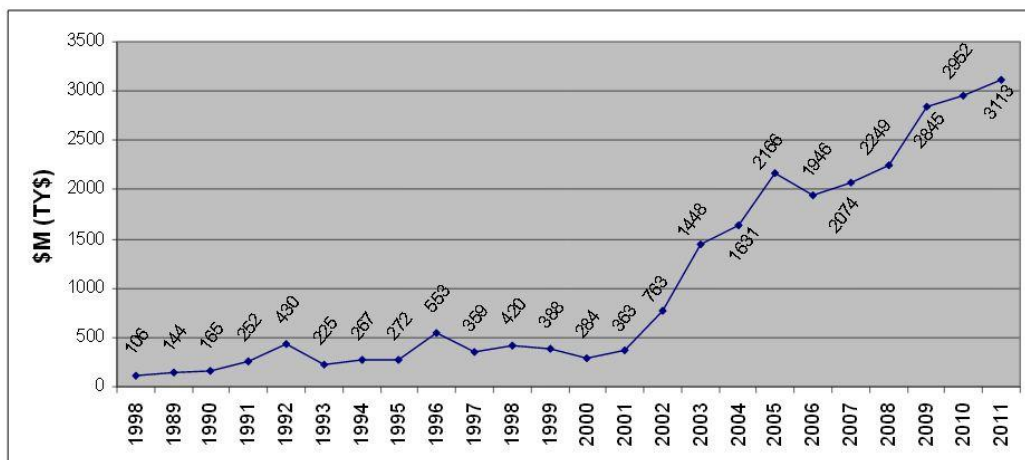
Finalmente se realizaron pruebas de validación de los modelos de control obtenidos por estudiantes de la universidad EAFIT, para comprobar el buen funcionamiento del banco de pruebas.



# INTRODUCCIÓN

El uso de UAV's (unmanned Air Vehicles) o vehículos aéreos no tripulados se remonta a mediados del siglo XX (The UAV, 2015), pero ha sido durante esta última década que ha habido un gran avance en el desarrollo de estos vehículos, principalmente para el uso en aplicaciones de carácter militar, misiones de reconocimiento, rescate, combate, etc.

Debido a la complejidad de los vehículos, estos conllevan grandes retos en diferentes áreas como en la ingeniería de sistemas, electrónica, control, mecánica y aeronáutica (Grau, 2012). Es por esto que en los últimos años se ha hecho una gran inversión y se ha generado una gran cantidad de investigación respecto a este tema, esto se puede evidenciar en las 131 patentes registradas desde el año 2014 (WIPO, 2015), y en el presupuesto de Estados Unidos para el año 2015 destinado a la investigación y desarrollo de drones, el cual supera los 2.5 billones de dólares (Mead, 2014).



**Figura 1. Inversión del (DoD) de EEUU para el desarrollo de drones (Departamento de defensa EEUU., 2013).**

En la Figura 1 es posible observar la cantidad en millones de dólares (USD), destinados por el departamento de defensa de los Estados Unidos para la investigación y desarrollo de drones de carácter militar en los últimos 20 años. En esta figura se puede ver que a partir del año 2001 esta inversión ha venido aumentando de forma significativa, pasando de un promedio de 302 millones de dólares anuales hasta llegar a los 3.000 millones de dólares en el año 2011.

Gracias a la complejidad de estos vehículos y a la cantidad de aplicaciones para las cuales estos están siendo utilizados, estos sistemas han despertado un gran interés dentro de las diferentes comunidades educativas del país como lo es el caso de la universidad EAFIT, donde actualmente se han venido generando distintas investigaciones acerca del diseño mecatrónico y el control de este tipo de vehículos.

Durante estas investigaciones se ha evidenciado la importancia de la realización de pruebas y ensayos para comprobar el buen funcionamiento de todos los sistemas del vehículo, como lo son la estrategia de control, su resistencia mecánica, maniobrabilidad, desempeño, etc. Lo que hace necesario desarrollar dispositivos y procedimientos que permitan realizar estas pruebas con el fin de facilitar la comprensión del sistema, y a su vez disminuir el riesgo de los usuarios o la integridad del equipo.

Gracias a esto, surge la necesidad de construir un banco de pruebas que permita realizar diferentes montajes de multirrotores, con el fin de probar estrategias de control de actitud y desplazamiento para sus diferentes grados de libertad, bien sea de forma individual o simultánea, y que a su vez permita medir fácilmente algunas de las variables como el empuje generado por los motores, ya que estas son importantes para la obtención del modelo matemático y el control del sistema.

Durante los últimos años se han venido desarrollando diferentes bancos de pruebas que permiten la realización de este tipo de ensayos, entre estos se pueden encontrar algunos bancos comerciales como el Quanser - 3DOF Hover y el Quanser - 3DOF Helicopter, desarrollados por la compañía Quanser Inc. Estos bancos permiten a los usuarios realizar pruebas de control de actitud para 3 de los 6 grados

de libertad de los multirrotores como *Pitch*, *Roll* y *Yaw* o *Pitch*, *Yaw* y elevación respectivamente. Además estos bancos dan la posibilidad de llevar a cabo una adquisición de datos acerca del comportamiento del multirrotor por medio de diferentes sensores.

Adicionalmente se pueden encontrar bancos desarrollados con el fin de realizar pruebas particulares durante distintos proyectos e investigaciones. Uno de estos es el desarrollado por Felipe Jaramillo Gómez, estudiante de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, el cual permite llevar a cabo pruebas de vuelo para 3 de los 6 grados de libertad de multirrotores de manera simultánea por medio de un mecanismo tipo giróscopo.

Generalmente, estos bancos de pruebas utilizan diferentes mecanismos y restricciones cinemáticas para lograr las trayectorias o movimientos deseados de sus multirrotores.

De esta manera, si el banco de pruebas a desarrollar durante este proyecto pretende permitir a los usuarios la realización de pruebas de control para multirrotores, éste debe admitir los siguientes ensayos de control:

**Control de actitud:**

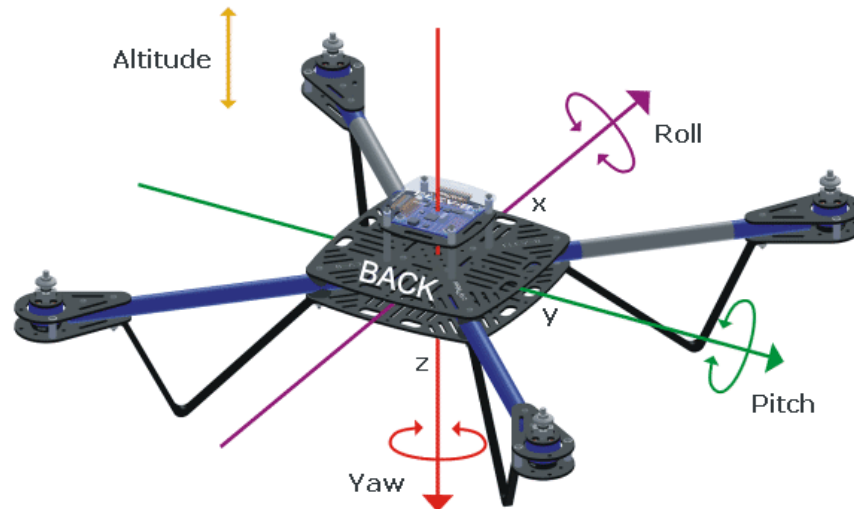
- Control de *Pitch*.
- Control de *Roll*.
- Control de *Yaw*.

**Control de desplazamiento:**

- Control de desplazamiento en X.
- Control de desplazamiento en Y.
- Control de desplazamiento en Z.

**Control de actitud y desplazamiento:**

- Desplazamiento en X + *Pitch*.
- Desplazamiento en Z + *Pitch/Roll*.



**Figura 2. Grados de libertad de un multirrotor (Montgomery, 2014)**

Para lograr este objetivo, el banco deberá permitir no solo la restricción de los grados de libertad necesarios para la realización de las distintas pruebas por medio de restricciones cinemáticas, sino también la adquisición de datos como desplazamientos en X, Y, Z y ángulos de *Pitch*, *Roll* y *Yaw* para la retroalimentación de las estrategias de control.

A continuación en el capítulo 2, se presenta información acerca del estado del arte de diferentes bancos de pruebas para multirrotores y se describen algunas de sus características como los mecanismos utilizados para el movimiento, la sensórica utilizada para la adquisición de datos y el tipo de movimiento que estos permiten al multirrotor. Además se muestran también algunos mecanismos y tipos de restricciones cinemáticas las cuales pueden ser utilizadas en estos bancos de pruebas y los diferentes tipos de multirrotores que se pueden encontrar comúnmente en el mercado, sus dimensiones y la instrumentación que estos utilizan durante su vuelo.

En el capítulo 3, se realiza una descripción detallada de los métodos utilizados para llevar a cabo las diferentes pruebas realizadas durante el proyecto, se muestra la metodología de diseño y sus diferentes fases utilizadas para la definición de soluciones y su posterior implementación. Por su parte, en el capítulo 4 se presentan los resultados del proyecto una vez aplicada la metodología descrita en el capítulo anterior y se realiza una discusión los mismos. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones acerca del desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Diseñar y construir un banco de ensayos para la realización de pruebas durante la fase de diseño de multirrotores, el cual permita validar estrategias de control de actitud y desplazamiento por medio de montajes que limiten sus grados de libertad.

### **Objetivos específicos**

1. Elaborar el diseño conceptual del banco de pruebas tomando como base la metodología de Pahl y Beitz con el fin de verificar su debido funcionamiento teórico.
2. Construir un prototipo del banco de pruebas mediante el uso de máquinas y herramientas de la universidad EAFIT para la validación del diseño.
3. Construir montajes para las diferentes pruebas de actitud y desplazamiento del multirrotor.
4. Realizar pruebas del banco y los montajes mediante el uso de un multirrotor con el fin de verificar su desempeño.

## **ALCANCE**

Debido a la necesidad de realizar pruebas durante el proceso de diseño de vehículos aéreos no tripulados (UAV's), se espera diseñar y construir un banco de pruebas, el cual permita llevar a cabo ensayos de actitud y desplazamiento de multirrotores comerciales y de diseños propios de estudiantes de la comunidad académica e investigativa, permitiendo al vehículo contar con los grados de libertad *Pitch*, *Roll*, desplazamiento en X, desplazamiento en Y y desplazamiento en Z. Este banco debe permitir al multirrotor un desplazamiento de 1.4 metros en sus tres ejes y una variación de sus ángulos *Pitch* y *Roll* de 90°.

## **PALABRAS CLAVE.**

<b>Palabra</b>	<b>Significado</b>
UAV o Drone	Un UAV o unmanned aerial vehicle por su siglas en inglés, es un vehículo aéreo no tripulado, es decir una aeronave que vuela sin tripulación y es pilotada a control remoto (Ecured, 2015).
Banco de pruebas	Plataforma que permite la realización de pruebas y experimentación de proyectos en desarrollo, con el fin de poder llevar a cabo pruebas seguras y repetibles.
Multirrotor	Vehículo aéreo con más de dos rotores.
Cuadricóptero o Quadcopter	Multirrotor compuesto por cuatro rotores.
Roll	Ángulo de balanceo o inclinación lateral derecha o izquierda del multirrotor.
Pitch	Ángulo de cabeceo o inclinación hacia adelante o atrás del multirrotor.
Yaw	Ángulo de guiñada o rotación del multirrotor sobre su propio eje.

**Tabla 1. Palabras clave.**

# ESTADO DEL ARTE

Antes de proceder con la fase de diseño del banco de pruebas, se llevó a cabo una búsqueda de proyectos, patentes y artículos comerciales, los cuales tratan como uno de sus temas principales el desarrollo de bancos de pruebas para multirrotores, restricciones cinemáticas y adquisición de datos. Durante esta investigación se realizó una revisión de los antecedentes acerca del desarrollo de este tipo de bancos de pruebas que facilitan el proceso de diseño y control de multirrotores, sus principales características como instrumentación y mecanismos utilizados para el movimiento del multirrotor. Además se realizó también una consulta del estado del arte acerca de los multirrotores comúnmente encontrados en el mercado teniendo en cuenta aspectos técnicos como sus dimensiones, la electrónica y la sensórica implementada. Esta investigación se realizó con el fin de obtener a partir de esta información, diferentes especificaciones de diseño de producto para el banco de pruebas a desarrollar tales como dimensiones, sensórica, sistemas de adquisición de datos, mecanismos para la restricción de grados de libertad del multirrotor, entre otras.

## **Multirrotores**

Debido al creciente uso de los vehículos multirrotores en los últimos años, y al aumento en el desarrollo de nuevos diseños y tecnologías relacionadas con este tipo de equipos, actualmente es posible encontrar una gran variedad de multirrotores con características diferentes de acuerdo a sus aplicaciones. Estas diferencias se pueden evidenciar principalmente en sus dimensiones, la disposición



de sus rotores, el número de rotores utilizados para el movimiento y sus componentes electrónicos.

A continuación se muestran algunos tipos de multirrotores comúnmente utilizados y se realiza una síntesis acerca de sus características y diferencias.

- **Parrot AR.Drone 2.0**

El parrot AR.Drone 2.0 es un multirrotor del tipo de los cuadirrotores (4 rotores), creado por la empresa francesa Parrot, el cual está diseñado para ser controlado por dispositivos móviles.



**Figura 3. Parrot AR.Drone 2.0 (Parrot, 2015)**

Este multirrotor presenta una configuración en “X” (dos motores atrás y dos adelante) con una distancia diagonal de 451 milímetros entre cada hélice. Este cuenta además cuenta con un sensor de ultrasonido para medir su altura, un giróscopo de 3 ejes con una precisión de 2000°/seg y un acelerómetro de 3 ejes con una precisión de +/- 50 mg (Parrot, 2015).

El Parrot AR. Drone 2.0, cuenta además con un chasis fabricado a partir de fibra de carbono, cuatro motores sin escobillas de 14.5W de potencia con sus controladores

y una batería LiPo de 3 celdas y 1500 mAh para la alimentación de los motores y demás componentes electrónicos.

- **DJI Phantom**

Este multirrotor, al igual que el anterior pertenece al tipo de los cuadirrotores y presenta una configuración en “X”. Pero a diferencia del Parrot AR.Drone 2.0, el Phantom tiene una distancia de 290 milímetros entre sus hélices, lo que lo hace más compacto.



**Figura 4. Cuadricóptero DJI Phantom 1 (DJI, 2015).**

Adicionalmente, este multirrotor cuenta con un sensor barométrico para la medición de su altura y una IMU (Siglas en inglés para unidad de medición inercial) para la medición de los ángulos de rotación Pitch, roll y Yaw, además de un módulo de GPS para la determinación de su ubicación y velocidad (DJI, 2015).

Este multirrotor está compuesto por un chasis de policarbonato inyectado, cuatro motores sin escobillas de 140W de potencia con sus controladores y una batería de LiPo de tres celdas y 5200 mAh.

- **DJI S1000 Octocopter**

Este multirrotor, como su nombre lo indica pertenece al tipo de los octorrotores y presenta un radio de 522.5 milímetros entre el centro y sus motores. Este equipo está compuesto por un chasis en fibra de carbono, 8 motores sin escobillas de 400W de potencia con sus controladores y una batería LiPo de 6 celdas y 20000 mAh.



**Figura 5. Octorrotor DJI S1000 (DJI, 2015).**

Adicionalmente este octorrotor cuenta con una unidad de medición inercial, la cual contiene un acelerómetro de tres ejes y un giróscopo de tres ejes para la adquisición de datos de actitud y un sensor barométrico para la medición de su altura. Este multirrotor también cuenta con un módulo de GPS para la determinación de su ubicación.

De forma similar a estos multirrotores, existen una gran variedad de diseños diferentes de acuerdo a las necesidades y objetivos de los usuarios, ya que existen

un gran número de aplicaciones para este tipo de vehículos como la fotografía aérea, competencias de velocidad, acrobacias, entrega de paquete, entre otras, las cuales requieren de distintas prestaciones por parte de los equipos como capacidad de carga, velocidad, agilidad, robustez. etc. Sin embargo debido a su simplicidad, bajo costo y estabilidad, los cuadricópteros como los presentados en la Figura 3 y Figura 4, que presentan dimensiones entre 300 y 500 milímetros de distancia diagonal entre sus hélices, son uno de los tipos de multirrotores más utilizados actualmente.

## **Controladores de vuelo para multirrotores**

En el mercado actual existen un gran número de tarjetas controladoras de vuelo utilizadas para el control de multirrotores, tanto de forma remota por medio de transmisores, como de forma autónoma por medio de programación. Estas tarjetas permiten a los usuarios modificar diferentes parámetros del multirrotor y pueden diferir en cuanto a sus prestaciones de acuerdo a las necesidades de los usuarios. Entre algunas de las tarjetas encontradas más comúnmente en el mercado se encuentran las siguientes.

- **Ardupilot APM 2.6**

El APM (Ardupilot Mega) es un controlador de vuelo con piloto automático, el cual posee un giróscopo de tres ejes, acelerómetro, y magnetómetro para su control de actitud, al igual que un sensor barométrico para su medición de altura. De manera opcional, puede ser adicionado a este un módulo de GPS con brújula para vuelos autónomos y programación de rutas de vuelo por medio de waypoints (Electrónica RC, 2015). Este es un dispositivo de código abierto que es compatible con el software Arduino, lo que facilita su programación y la modificación de sus parámetros de control.

- **3DR Pixhawk**

Al igual que el APM 2.6, el controlador pixhawk de 3D Robotics contiene también un acelerómetro de tres ejes, un giróscopo y un magnetómetro para control de actitud y una sensor barométrico para control de altitud, pero a diferencia del anterior, el cual tiene un procesador de 8-bits, el Pixhawk contiene un procesador con mayor velocidad de procesamiento de 32-bits, lo que le permite integrar más funciones a los programas de control sin exceder su límite de procesamiento.

- **Multiwii PRO**

El controlador Multiwii PRO, es un controlador un poco más sencillo que los presentados anteriormente, con menor capacidad de procesamiento y menor cantidad de puertos de conexión. A diferencia del APM y del Pixhawk, este controlador puede controlar máximo 6 motores en lugar de 8 y algunas funciones como el control de videocámaras son un poco más limitadas. También, al igual que el APM, este controlador puede ser compatible con el software Arduino.

## **Restricciones cinemáticas y mecanismos**

Durante el diseño de bancos de pruebas en los cuales se requieren movimientos de traslación y/o rotación específicos en direcciones determinadas, se hace indispensable el uso de diferentes mecanismos y restricciones cinemáticas.

Generalmente estos mecanismos están conformados por elementos rígidos denominados eslabones, los cuales se relacionan entre sí a partir de nodos o pares cinemáticos que permiten el movimiento relativo entre ellos (Norton, 1999) y definen a su vez, el número de grados de libertad de la unión de acuerdo al tipo de par cinemático como se ve en los ejemplos de la Figura 6.

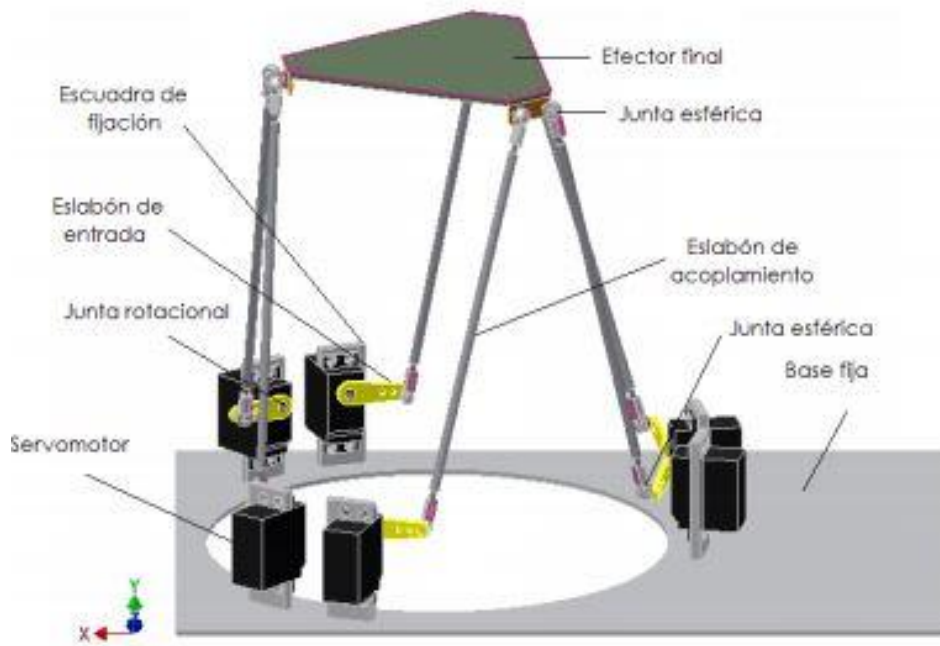
<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Grados de Libertad</b>
Revoluta	R	1
Prismática	P	1
Hélice	H	1
Cilíndrica	C	2
Esférica	S	3
Planar	Pl	3
Junta universal	U	2

**Figura 6. Pares cinemáticos y sus grados de libertad (Angel, 2012).**

A continuación se listan algunos mecanismos comunes que pueden ser encontrados en diferentes aplicaciones.

- Mecanismo de barras
- Mecanismos oscilantes
- Mecanismo de biela – manivela
- Mecanismo de levas
- Mecanismos paralelos

Entre los mecanismos paralelos se pueden encontrar algunos como el utilizado en la plataforma de Stewart (Ver Figura 7), creada en el año 1965, el cual permite un movimiento de 6 grados de libertad y que ha sido utilizado en diferentes simuladores de vuelo como el ACFS de la NASA, el cual puede simular una cabina de un avión comercial (Guerrero Ochoa & Coronel Arízaga, 2013).



**Figura 7. Plataforma de Stewart (Guerrero Ochoa & Coronel Arízaga, 2013).**

Esta plataforma consiste en dos placas, una fija y otra móvil, unidas por medio de seis actuadores lineales, los cuales a su vez se ensamblan mediante juntas universales o esféricas. Es por esto que esta plataforma se conoce con el nombre de 6 DOF-UPS (6 grados de libertad con junta universal, prismática y esférica).

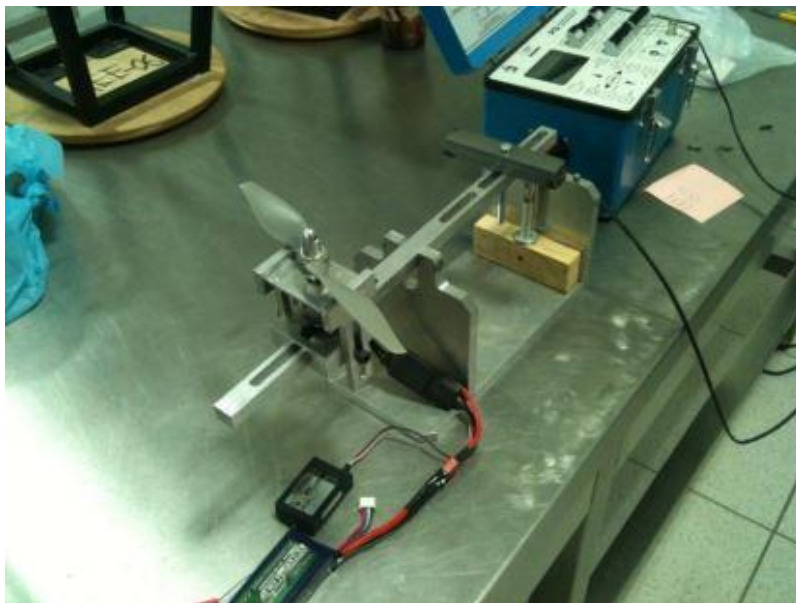
## **Banco de pruebas para multirrotores**

Luego de una profunda investigación fue posible evidenciar, que en la actualidad se ha venido trabajando fuertemente en el diseño de Drones, principalmente del tipo de los multirrotores (Ver Figura 8), debido a que estos brindan una mayor estabilidad y agilidad que los helicópteros o birotos gracias a su cantidad de motores, además estos pueden alcanzar velocidades de hasta 50 mph y cuentan con despegue y aterrizaje verticales, lo que les permite llegar a lugares de difícil acceso, y los hace aptos para una gran cantidad de aplicaciones.



**Figura 8. DJI Inspire 1 Quadcopter (DJI, 2015).**

Gracias a estas cualidades y al hecho de que su construcción no es muy compleja, actualmente existe una gran cantidad de proyectos relacionados con el diseño de estos vehículos, los cuales se han enfrentado al reto de la realización de pruebas de sus multirrotores. Debido a esto se han visto en la necesidad de diseñar y construir diferentes bancos de pruebas de acuerdo a sus propias necesidades como se ve a continuación.



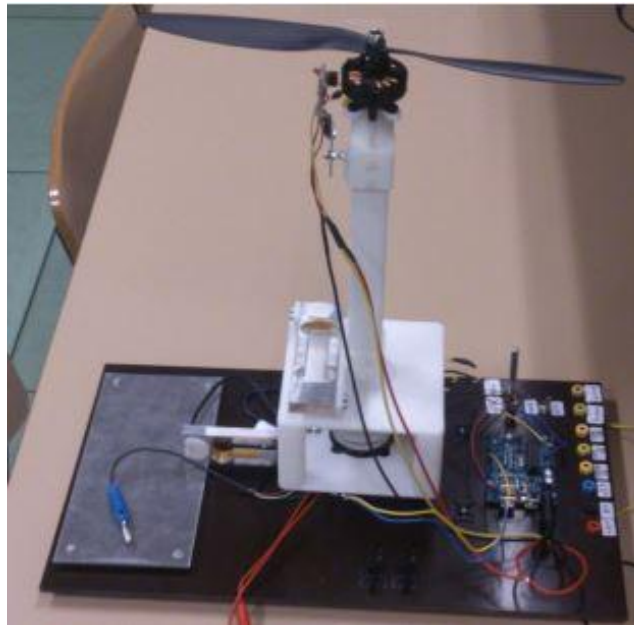
**Figura 9. Prueba de arrastre de motores (Armando Isaac Aguilar A., 2013).**



En la Figura 9 se puede observar uno de los bancos de pruebas diseñados comúnmente para este tipo de vehículos, el cual tiene como fin conocer la fuerza de empuje o arrastre generada por el conjunto motor-hélice (Armando Isaac Aguilar A., 2013), ya que este parámetro es de gran importancia para la modelación matemática del sistema y el posterior control del multirrotor.

Se puede ver que este banco utiliza un mecanismo de un 1 Dof por medio de un par de rotación, el cual consta de una viga pivotada en su centro sobre una de las placas de soporte. En uno de los extremos de la viga se encuentra el conjunto motor-hélice a caracterizar y en el otro extremo se ubica una celda de carga la cual arroja una señal análoga de voltaje, a partir de la cual se puede calcular la fuerza ejercida.

De forma similar al banco anterior, han sido desarrollados diferentes versiones de bancos de pruebas para medir la fuerza de arrastre producida por los motores. Estos pueden diferenciarse en aspectos como el tipo de sensor utilizado para medir la fuerza (e.g, balanzas, galgas de deformación), su mecanismo, materiales, etc.



**Figura 10. Medición de fuerza de propulsión para cuadricópteros (Taillefer, 2014).**

En la Figura 10 se puede ver un banco de pruebas, que si bien está diseñado para el mismo fin de medir la fuerza de arrastre del conjunto motor-hélice, presenta ciertas

diferencias con el banco presentado en la Figura 9. Este banco a diferencia del anterior utiliza dos galgas extensiométricas, una para la medición de la fuerza de empuje y otra para la medición del par torsor generado por el motor y la hélice. Adicionalmente este banco cuenta con sensores de corriente y voltaje que le permiten estimar la duración de la batería de alimentación del motor.

Para la adquisición de datos, este banco utiliza un microcontrolador Arduino Duemilanove, el cual recibe las señales de voltaje emitidas por las galgas extensiométricas luego de ser acondicionadas por medio de amplificadores operacionales (Taillefer, 2014).

De igual forma a los bancos anteriores, se han desarrollado bancos de pruebas con el fin de determinar diferentes parámetros y comportamientos del multirrotores tales como alturas, ángulos de cabeceo, ángulos de alabeo, desplazamientos, etc. Ya que estas son variables esenciales para la construcción del modelo matemático del multirrotores. Este modelo se hace necesario debido a la complejidad e inestabilidad del sistema, ya que lograr un control preciso para un multirrotores, de manera empírica o por tanteo puede ser complicado, por lo que se recomienda una estrategia de control basada en el modelo matemático.



**Figura 11. Pruebas de actitud con 3 grados de libertad (Gómez, 2013).**

En la Figura 11 puede verse un banco de pruebas de actitud para un cuadricóptero, el cual por medio de un mecanismo tipo giróscopo, conformado por cuatro pares de rotación admite el movimiento del vehículo en 3 de sus 6 grados de libertad, permitiendo así observar el comportamiento de los ángulos *Pitch*, *Roll* y *Yaw* de forma simultánea (Gómez, 2013).

De manera similar a estos bancos de pruebas, los cuales no son desarrollados con el fin de validar diferentes estrategias de control para distintos multirrotores, sino que son contruidos de acuerdo a las necesidades específicas de cada proyecto; también existen algunos bancos de pruebas comerciales como los de la Figura 12 y Figura 13, diseñados para validar estrategias de control y medir variables como la fuerza de empuje.



**Figura 12. Banco Quanser 3 DOF hover (Quanser Inc., 2015).**

Este banco de pruebas permite un movimiento para 3 de los 6 grados de libertad (*Pitch*, *Roll* y *Yaw*) de un multirroto propio el cual tiene una distancia entre hélices de 350 milímetros y un peso de 1.37 Kg. Esto lo logra por medio de un mecanismo formado por tres pares cilíndricos el cual le permite al vehículo un movimiento de  $360^\circ$  para su ángulo *Yaw* y de  $75^\circ$  para sus ángulos *Pitch* y *Roll*. Además, este hace uso de encoders ópticos con una resolución de 8192 conteos/rev para la retroalimentación del sistema de control en cuanto a los valores de sus ángulos de rotación. (Quanser Inc., 2015).



**Figura 13. Banco Quanser helicopter 3 DOF (Quanser Inc., 2015).**

Este banco al igual que el anterior, utiliza encoders ópticos de alta resolución para la retroalimentación del sistema de control y le permite al multirrotor un movimiento en 3 de sus 6 grados de libertad (*Pitch*, *Yaw* y elevación), esto lo logra gracias a su mecanismo conformado por un par cilíndrico en su base fija y dos pares de rotación en su barra de soporte, los cuales le permiten al multirrotor tener un rango de movimiento para su ángulo *Yaw* de  $360^\circ$ ,  $60^\circ$  para su ángulo *Pitch* y de  $63.5^\circ$  para su elevación (Quanser Inc., 2015).

Adicionalmente, estos dos bancos de pruebas son completamente compatibles con diferentes softwares como Matlab, Simulink, Labview y Mapple.

De esta forma, pueden encontrarse diferentes bancos de pruebas para realizar mediciones de variables y parámetros según la necesidad de los proyectos. Se puede ver que estos diseños contienen una instrumentación y una sensórica para la toma de mediciones compuesta generalmente por encoders, sensores de ultrasonido, infrarrojos, galgas extensiométricas, sensores barométricos y unidades de medición inercial, así como también utilizan fuentes de corriente continua como fuentes variables o baterías Li-Po con diferentes características para la alimentación de los motores y sensores del banco.

Es posible observar también que estos bancos logran obtener un movimiento deseado del multirrotor y los grados de libertad requeridos, por medio de diferentes restricciones cinemáticas y mecanismos conformados por pares de rotación, cilíndricos y esféricos en su mayoría. Además estos pueden utilizar controladores de vuelo comerciales para el control del multirrotor como el APM 2.6, el Pixhawk y el Multiwii, así como también microcontroladores y tarjetas de adquisición de datos de uso general compatibles con softwares como Arduino, Labview, Simulink y Matlab para la implementación de sus rutinas de control.

# 1. METODOLOGÍA

Debido a que este banco de pruebas es un equipo mecatrónico, durante el proceso de diseño que se utilizó para el desarrollo de éste se siguieron dos metodologías diferentes de manera paralela, una para el diseño mecánico y otra para diseño electrónico. En cuanto al diseño mecánico la metodología utilizada se basó en algunas de las fases de la metodología de diseño de Pahl y Beitz (Beitz, 1996), la cual se muestra en la Figura 14.

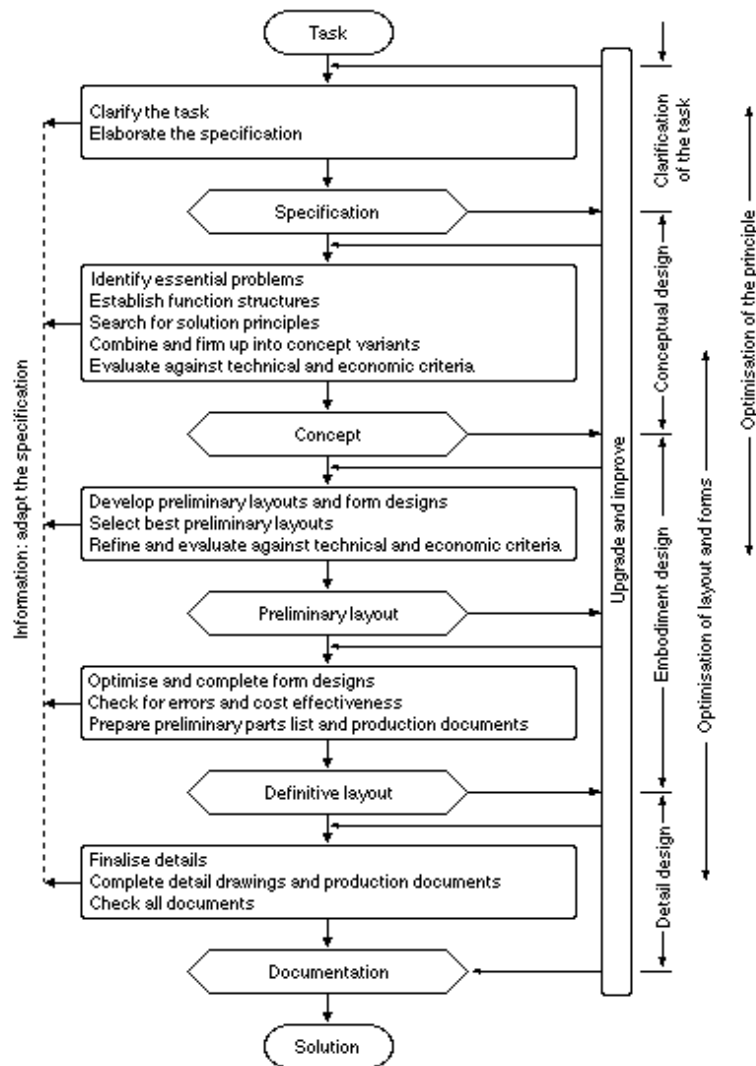


Figura 14. Metodología de diseño según Pahl y Beitz (Beitz, 1996).

## **1.1 Clarificación de la tarea**

Teniendo en cuenta la metodología anterior, el primer paso que se tomó para el desarrollo del banco de pruebas, fue definir las especificaciones de diseño de producto (PDS) a partir de la información recopilada durante la investigación del estado del arte y una serie de preguntas realizadas a las personas que estarían a cargo de hacer las pruebas una vez el banco se encuentre terminado. Esto permitió determinar los requerimientos y deseos a partir de los cuales parte el proceso de diseño

## **1.2 Diseño conceptual**

Una vez definidos los requerimientos del banco de pruebas y luego de determinar la función principal del sistema y los flujos a los cuales este se encuentra sometido, se desarrolló una caja negra con el fin de conocer la forma en cómo estos flujos interactúan con el banco de pruebas.

A partir de estos flujos de entrada y salida identificados en la construcción de la caja negra, se desarrolló una estructura funcional del sistema en la cual se puede ver como es el comportamiento de los flujos de entrada a través de los distintos portadores de función y como estos interaccionan produciendo finalmente los flujos de salida deseados.

Luego de conocer los flujos y la forma en como éstos son transformados dentro de la estructura funcional, se procedió a construir una matriz morfológica, en la cual se propusieron diferentes portadores de función para las distintas actividades que debe cumplir el banco de pruebas. Para esto se dividió el banco en dos subsistemas principales y se definieron portadores de función para cada una de las actividades dentro de cada subsistema como se ve a continuación.



## **Mecánica**

- Estructura
- Restricción de movimiento
- Seguridad

## **Electrónica**

- Alimentación
- Procesamiento
- Sensórica

Finalmente a partir de esta matriz morfológica, se formularon tres posibles alternativas de diseño para el banco de pruebas realizando diferentes combinaciones de los portadores de función contenidos en ésta. Luego estas alternativas fueron sometidas a un proceso de evaluación y validación con el fin de comprobar cuál de los mecanismos utilizados para el desplazamiento del multirrotor presentaba un mejor desempeño, permitiendo un movimiento del multirrotor con poca fricción y sin presentar atascamientos, ya que este es uno de los grados de libertad más críticos que debe permitir el banco de pruebas. Adicionalmente por medio de estas tres alternativas fue posible comparar de manera paralela diferentes tipos de sensores de distancia y rotación, así como también sistemas de adquisición de datos, procesamiento de información y alimentación del banco de pruebas. Una vez definido el mejor tipo de mecanismo de desplazamiento se continuó con la implementación de los demás grados de libertad y la obtención de un diseño conceptual definitivo para proceder finalmente con la fase de diseño de detalle del banco de pruebas.

### **1.3 Corporificación y diseño de detalle**

Finalmente, luego de la evaluación y selección del diseño para el banco de pruebas se llevó a cabo la fase de diseño de detalle de éste. Durante esta etapa del proceso, con el fin de optimizar el diseño y definir los portadores de función definitivos que tendrá el prototipo final del banco, fue necesario evaluar por separado cada uno de los objetivos principales del sistema como lo son: permitir el movimiento vertical, horizontal, la rotación para *Pitch*, *Roll*, *Yaw* y limitar el desplazamiento del multirrotor.

Durante esta etapa de diseño se realizaron también los cálculos necesarios para el dimensionamiento de algunas de las partes mecánicas del banco de pruebas. Para esto se hizo uso de algunas ecuaciones que describen el movimiento en caída libre de un objeto y el teorema de conservación de la energía, como se puede ver a continuación.

$$V_f^2 = V_o^2 + 2gh$$

Donde:

- $V_f$  = velocidad final del objeto.
- $V_o$  = velocidad inicial del objeto.
- $g$  = aceleración de la gravedad.
- $h$  = Altura inicial del objeto.

$$E_{pe} = \frac{1}{2} (K)(\Delta X)^2$$

Donde:

- $E_{pe}$  = Energía potencial elástica.
- $K$  = Constante elástica del resorte.
- $\Delta X$  = Compresión del resorte.

$$E_m = E_p + E_k + E_{pe}$$

Donde:

- $E_m$  = Energía mecánica.
- $E_p$  = Energía potencial.
- $E_k$  = Energía cinética.

Durante esta fase de diseño se definieron también las dimensiones de los distintos elementos estructurales del banco de pruebas y los mecanismos a utilizar para permitir los diferentes movimientos del multirrotor, así como también se especificaron y caracterizaron los sensores a utilizar en el banco para la adquisición de los datos del comportamiento del multirrotor.

## **1.4 Pruebas y validación del prototipo**

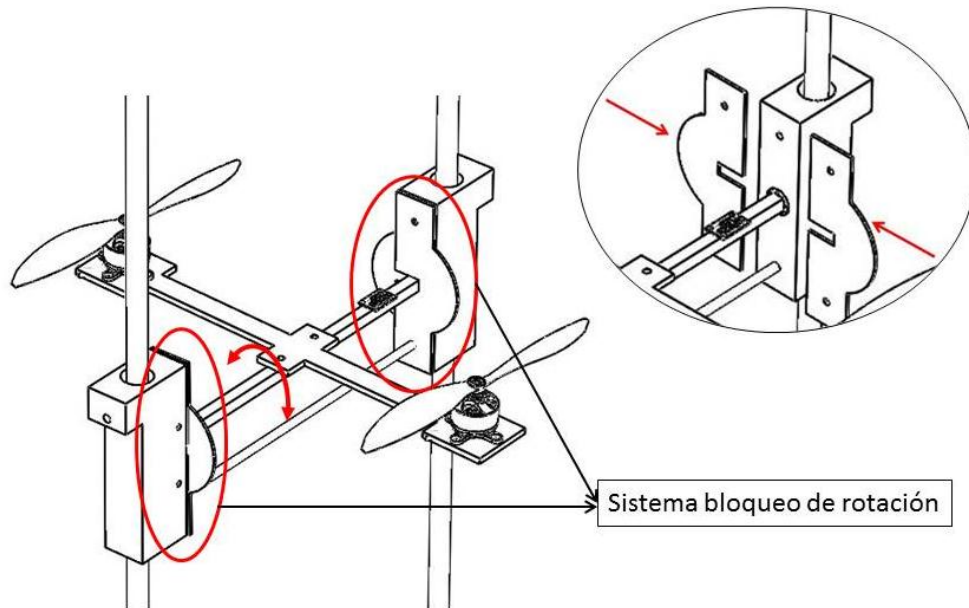
Una vez generado un concepto de diseño y habiendo realizado la fase de diseño de detalle y construcción del prototipo del banco, se llevaron a cabo una serie de pruebas para cada uno de sus sistemas, con el fin de validar el diseño y comprobar su funcionamiento de acuerdo a lo especificado en el PDS (Ver Anexo 1), garantizar el buen desempeño del banco y el cumplimiento de los objetivos propuestos.

De acuerdo a esto, se realizaron las siguientes pruebas:

- **Sistema de vuelo vertical**

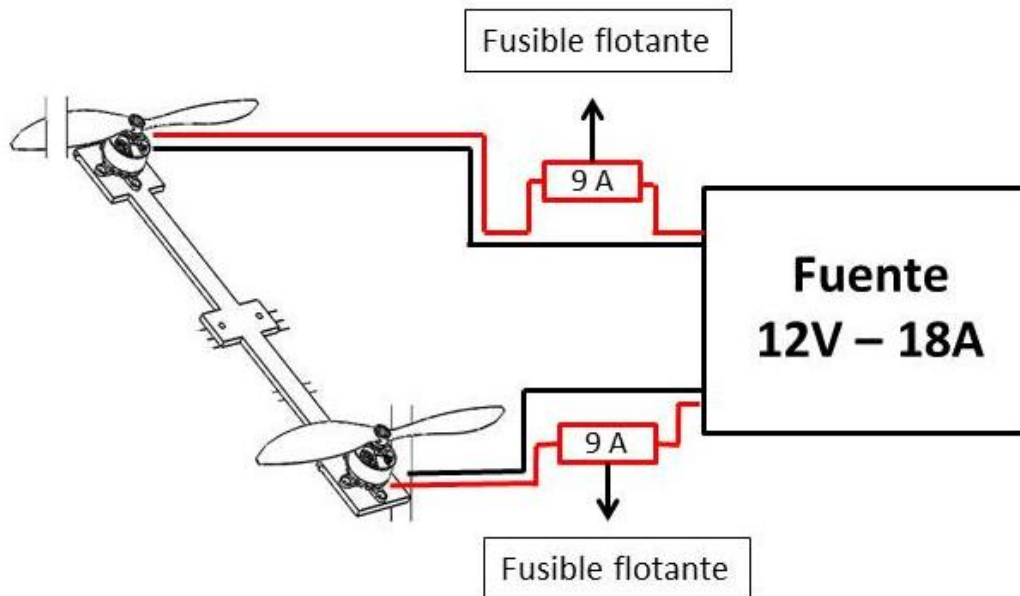
Por medio de esta prueba de vuelo vertical, el objetivo es comprobar el buen funcionamiento del sistema de guías y bujes, el cual debe permitir un movimiento libre del multirrotor, presentando la menor resistencia posible y sin atascamientos.

Debido a que esta será una prueba de un solo grado de libertad para el desplazamiento en Z, se hará uso también del sistema de bloqueo de rotación como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15. Sistema de bloqueo de rotación.**

Para llevar a cabo esta prueba, se alimentaron tanto los dos motores del multirrotor como la sensórica por medio de la fuente de alimentación de corriente continua como se ve en la Figura 16 y mediante el uso de un potenciómetro y un Microcontrolador Arduino Mega 2560, se realizó una prueba de movimiento en la cual la potencia entregada a los motores del multirrotor, fue regulada por medio del giro del potenciómetro, el cual a través del microcontrolador varía la señal de PWM enviada a los controladores de los motores.



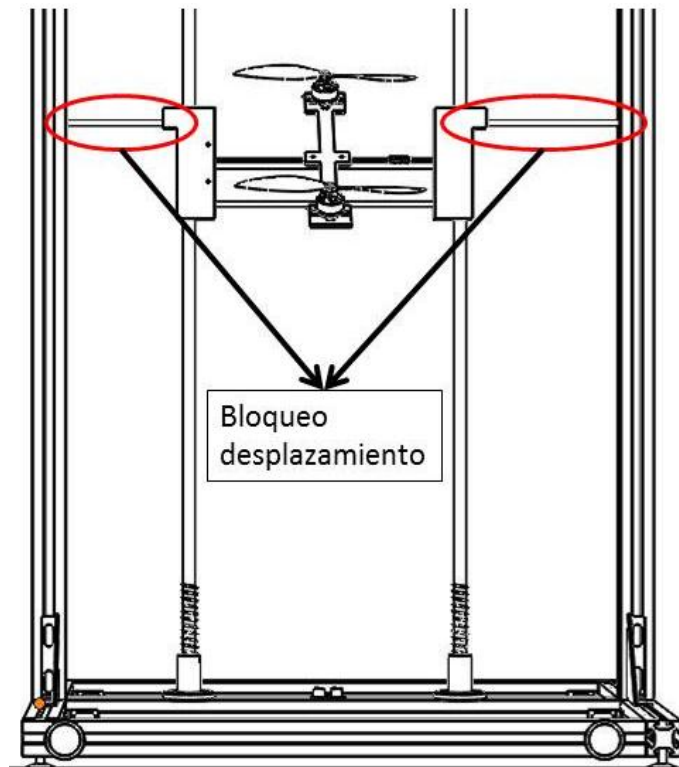
**Figura 16. Configuración de motores, fuente y fusibles.**

Gracias a esta variación de la señal PWM y su consecuente variación de la velocidad de los motores, se logró un desplazamiento ascendente o descendente del multirroto, comprobando así la libertad de movimiento del montaje.

- **Sistema de rotación**

Luego de realizar la prueba de desplazamiento vertical, se procedió a validar el sistema de rotación del multirroto para la simulación de los grados de libertad *Pitch* y *Roll*, así como también el sistema diseñado para limitar el ángulo de rotación.

Inicialmente, para esta prueba se hizo uso del sistema de bloqueo de desplazamiento vertical como se ve en la Figura 17, con el fin de conocer que tan sensible es el sistema a una diferencia de potencia entre sus dos motores.



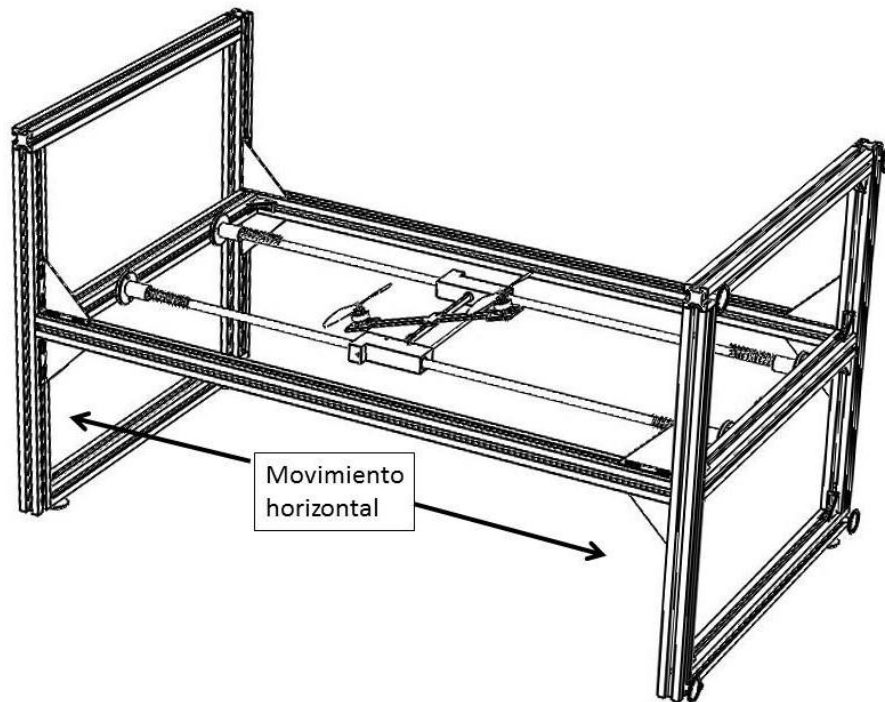
**Figura 17. Bloqueo de desplazamiento vertical.**

Para lograr esta variación en la potencia de los motores de manera individual, se usó una configuración similar a la utilizada en la prueba de vuelo vertical, en la cual en lugar de utilizar un potenciómetro para la variación de la potencia de los dos motores, se usaron dos con el fin de controlar cada motor de forma independiente.

- **Sistema de vuelo horizontal**

Una vez verificado el funcionamiento del sistema de rotación, se procedió con la realización de pruebas de desplazamiento horizontal de dos grados de libertad (desplazamiento en X/Y y ángulo *Pitch/Roll*).

Para esta prueba fue necesario ubicar el banco en posición horizontal como se observa en la Figura 18. Una vez el banco se encontraba en esta posición, por medio de dos potenciómetros conectados como se describió anteriormente para la prueba de rotación, se realizó la prueba de vuelo horizontal.



**Figura 18. Banco de pruebas en posición horizontal.**

Para esta prueba se controló la velocidad de cada uno de los motores de forma individual por medio de los potenciómetros, con el fin de generar una inclinación en el multirroto y observar su desplazamiento horizontal y su sensibilidad.

- **Vuelo vertical con rotación**

Luego de probar los sistemas de vuelo vertical, horizontal y de rotación de manera individual, se realizó una última prueba del banco para los grados de libertad de desplazamiento en Z y ángulo *Pitch/Roll* de manera simultánea.

Esta prueba al igual que la prueba de vuelo horizontal, se realizó por medio de dos potenciómetros y un microcontrolador Arduino Mega 2560 para el control de potencia de los motores. Para ésta fue necesario retirar también los bloqueos de rotación del multirroto vistos en la Figura 15 con el fin de conocer el comportamiento del sistema bajo estas condiciones.

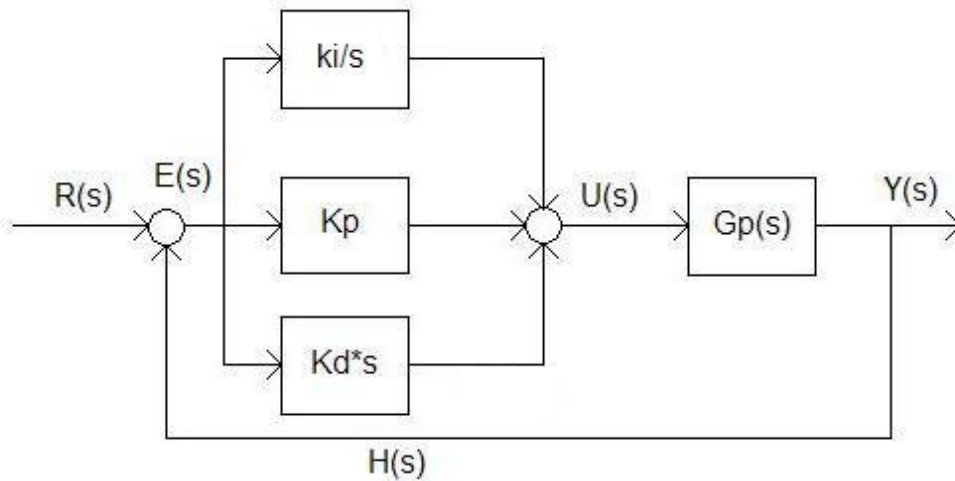
## **1.5 Validación de la electrónica y prueba de control de altura**

En cuanto a la parte electrónica del banco de pruebas, para su diseño no se siguió una metodología específica de diseño como la anterior, sino que se utilizaron distintos componentes con los cuales contaba la Universidad EAFIT y que permitieron el buen desempeño del banco. Entre estos componentes se encuentran los siguientes:

- Motores sin escobillas
- Variadores de velocidad
- Sensores de distancia
- Unidades de medición inercial
- Microcontroladores
- Tarjetas de adquisición de datos
- Fuentes de alimentación

Una vez integrados en el banco de pruebas estos componentes, con el fin de realizar una prueba de control como las que se llevarán a cabo normalmente por los usuarios y validar el buen funcionamiento de la electrónica del banco, se implementó una estrategia de control genérica conocida como control PID, la cual se basa en el error calculado a partir de la salida real del sistema y la deseada por el usuario para realizar una acción de control y minimizar esta diferencia ajustando la señal de entrada al sistema (Wikispace, 2015).





**Figura 19. Esquema de un control PID (Wikispace, 2015).**

Para la implementación de esta estrategia, fue necesario determinar la constantes de control proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativa ( $K_d$ ) propias del sistema. Para el caso de esta prueba, ya que se contaba con el sistema real, estas constantes se sintonizaron de forma manual o experimental, para lo cual se les asignó valores iniciales aleatorios y por medio de la experimentación, estos valores fueron optimizados hasta obtener un comportamiento deseado del multirrotor.

Para la realización de la prueba, se desarrolló una rutina de control mediante el software de Arduino de acuerdo al esquema presentado en la Figura 19 donde:

- $R(S)$  = Valor de altura deseado.
- $E(S)$  = Error del sistema.
- $K_i$  = Constante integral de control.
- $K_p$  = Constante proporcional de control.
- $K_d$  = Constante derivativa de control.
- $U(S)$  = Señal de control.
- $G_p(S)$  = Multirrotor.
- $H(S)$  = Altura sensada del multirrotor.
- $Y(S)$  = Salida del sistema.

Ésta luego fue cargada en un microcontrolador Arduino Mega 2560, y la retroalimentación de la altura del multirrotor se realizó por medio del sensor de distancia. Para ver el algoritmo de control refiérase al Anexo 7.

Una vez definidas las constantes de control, por medio del algoritmo cargado en el microcontrolador, se realizaron algunas pruebas para observar el comportamiento del multirrotor ante la entrada de un setpoint de altura definido por el usuario entre 0 y 1.4 metros.

## **2. RESULTADOS**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología expuesta anteriormente, así como también los análisis a partir de las pruebas de funcionamiento y validación tanto de las alternativas de diseño como del prototipo construido.

### **2.1 Clarificación de la tarea**

Una vez realizadas las preguntas a los usuarios del banco de pruebas y luego de haber llevado a cabo la investigación acerca del estado del arte, se definieron los requerimientos con los que debe cumplir el banco. Algunos de estos se enumeran a continuación. Para ver el PDS completo refiérase al Anexo 1.

- El banco debe ser seguro para evitar cualquier tipo de accidente ya que allí habrán piezas que se mueven a altas velocidades.
- Debe permitir realizar pruebas de los diferentes grados de libertad de los multirrotores tales como *Pitch*, *Roll* y desplazamientos en los ejes X, Y y Z.
- Los montajes requeridos para la realización de las pruebas deben ser de fácil uso.
- El banco no debe superar los 15 Kg y debe permitir el desplazamiento del mismo dentro del laboratorio.
- El banco debe permitir realizar pruebas de control a multirrotores de hasta 450 mm de distancia diagonal entre hélices.
- Debe ser un banco robusto ya que será para uso de estudiantes.

## 2.2 Diseño conceptual

Luego de realizar la fase de diseño conceptual del banco de pruebas siguiendo la metodología propuesta se obtuvieron los siguientes resultados.

- **Caja negra**

En la Figura 20 se puede observar la caja negra del sistema, en esta se evidencia que la función principal de este banco de pruebas, es la de validar diferentes estrategias de control para multirrotores de acuerdo a los setpoints de desplazamiento y rotación deseados por el usuario.

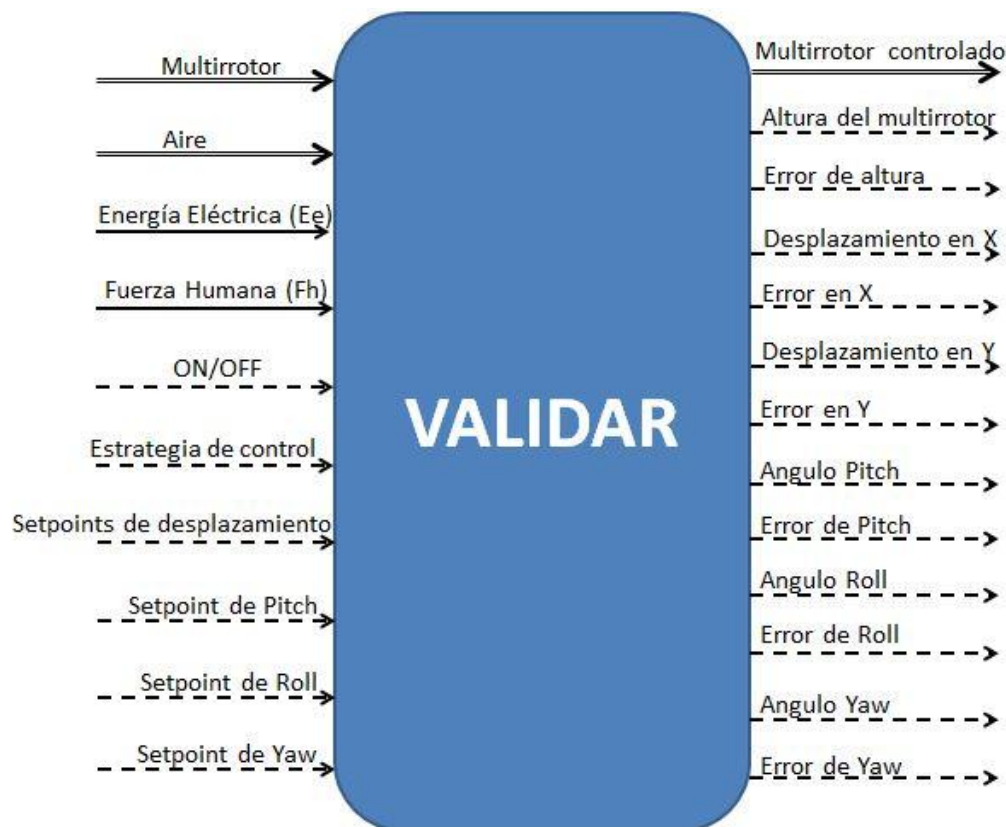
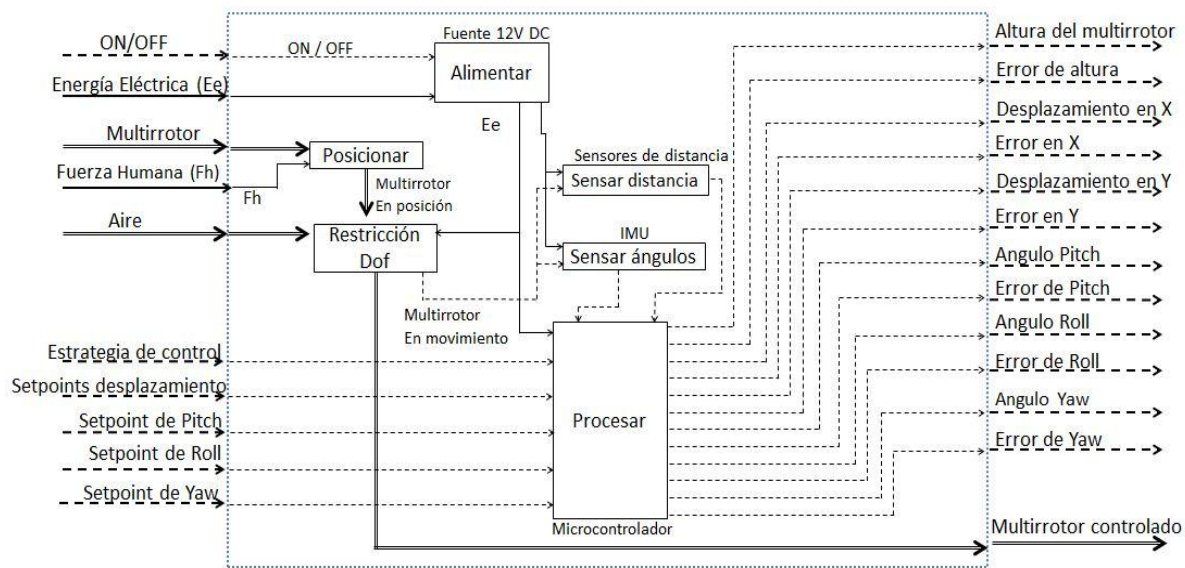


Figura 20. Caja negra del banco de pruebas.

A partir de esta caja negra puede observarse que al sistema le ingresan tres tipos de flujos principales que son materia, energía e información y éste entrega al usuario como flujos de salida, información acerca del comportamiento y el control del multirrotor, así como también el multirrotor controlado luego de aplicada la estrategia de control. Esto le permite al usuario comprobar la efectividad de su estrategia y su equipo.

- **Estructura funcional**



**Figura 21. Estructura Funcional del banco de pruebas.**

A partir de la estructura funcional presentada en la Figura 21, fue posible definir las siguientes actividades principales que debe realizar el banco de pruebas por medio de sus diferentes portadores de función.

- **Posicionar el multirrotor**

Ubicación del multirrotor en la posición correcta de acuerdo al tipo de prueba a realizar.

- **Alimentar**

Alimentación eléctrica para el multirrotor y la instrumentación del banco de pruebas

- **Sensar distancia**

Toma de datos del desplazamiento del multirrotor para la retroalimentación de la estrategia de control.

- **Sensar rotación**

Toma de datos de la rotación del multirrotor para los ángulos *Pitch* y *Roll* para la retroalimentación de la estrategia de control.

- **Procesar**

Procesamiento de la información obtenida por los sensores y la estrategia de control.

- **Restringir**

Restricción de los grados de libertad del multirrotor de acuerdo a la prueba a realizar.

## • Matriz Morfológica

Continuando con la metodología, se construyó la matriz morfológica que se muestra en la Figura 22.

POSICIONAR MULTIRROTOR	ALIMENTAR	SENSOR	PROCESAR	RESTRINGIR	POSICIONAR BANCO DE PRUEBAS
 Manualmente	 Toma de corriente	 Sensor Infrarrojo	 Arduino	 Perfil de aluminio	 
	 Batería Li-Po	 Sensor de ultrasonido	 DAQ	 prismático	
	 Fuente variable	 GPS		 Giróscopo	
	 Fuente fija de PC	 IMU		 Guías paralelas	
				 Mecanismo de rótula	

**Figura 22. Matriz morfológica.**

Como se puede ver en esta matriz, se definió para las tres alternativas de diseño que el posicionamiento del multirrotores en el banco de pruebas se hará a través del usuario, ya que la geometría de los multirrotores puede ser muy variable y hace que el diseño de una única forma de montaje para todas estas posibles geometrías sea bastante complejo.

Al mismo tiempo se puede ver que el sistema de alimentación para las dos primeras alternativas, consta de un fuente variable BK PRECISION de 0-30V y 0-30A

(Precision, 2015), la cual tiene como fin que el usuario tenga un control sobre la potencia entregada a los motores por medio de los diales de voltaje y corriente, y que éste pueda establecer un límite para ésta potencia.

A diferencia de estas dos alternativas, para la opción de diseño número tres, se seleccionó una fuente de corriente continua como las utilizadas en los computadores, la cual puede entregar un voltaje fijo de 12 Voltios simulando una batería Li-Po de 3 celdas (11.1V) y tiene un límite de corriente de 18 Amperios. Debido a que estos valores de corriente y voltaje de la fuente son constantes, se cuenta con un límite de potencia entregada al banco, el cual permite proteger tanto la instrumentación del banco de pruebas como el multirrotor.

Además de estas características, las tres opciones de diseño cuentan con diferentes mecanismos para la restricción de los grados de libertad del multirrotor, además de una diferente instrumentación.

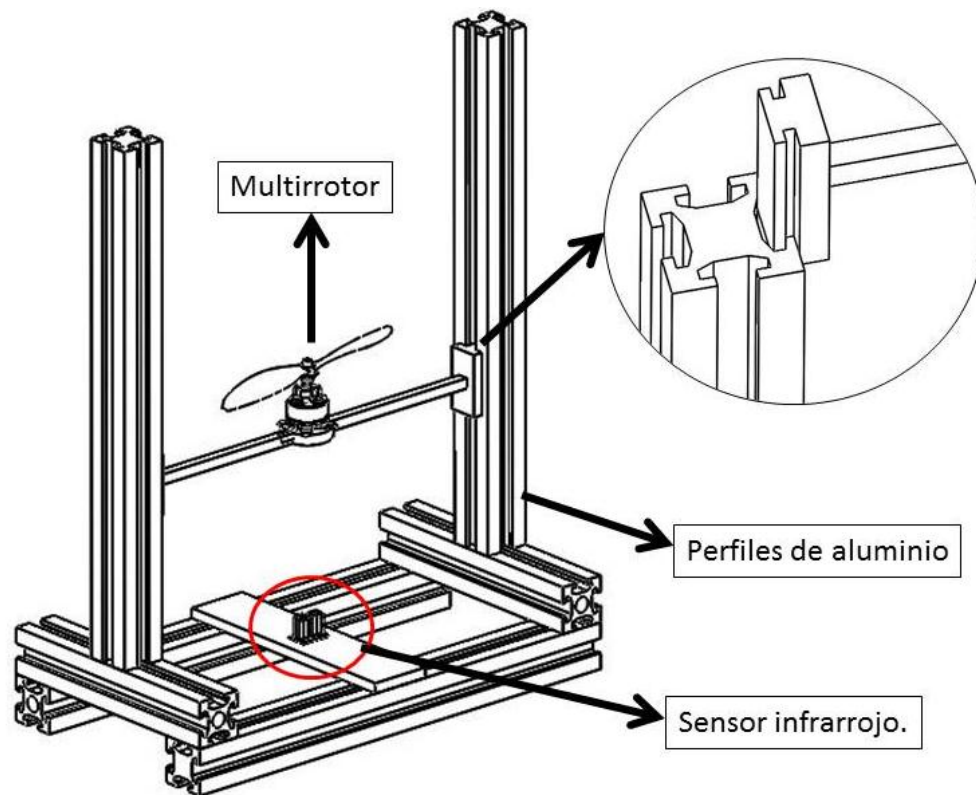
- **Primera alternativa de diseño para el desplazamiento del multirrotor:**

A continuación se presenta el primer prototipo construido y empleado para la validación del mecanismo de movimiento vertical del multirrotor.

<b>Función</b>	<b>Elemento Portador de Función</b>
Posicionamiento del banco	Manualmente por uno o dos usuario
Posicionamiento del multirrotor	Manualmente por el usuario
Alimentación de componentes electrónicos	Fuente variable de corriente directa
Sensar distancia y rotación	Sensor infrarrojo SHARP e IMU ArduIMU
Procesamiento de información	Arduino y DAQ Labview
Restricción de grados de libertad	Canales del perfil estructural de aluminio

**Tabla 2. Composición de alternativa de diseño 1.**





**Figura 23. Opción de diseño 1 (Mesa Tabares, 2014).**

Como se puede ver en el detalle de la Figura 23, el mecanismo utilizado en este diseño para permitir el desplazamiento del multirrotor consta de unas guías, las cuales por medio de una junta prismática con los perfiles de aluminio restringen el movimiento del multirrotor a un grado de libertad. Esto permite que una vez sea acelerado el motor y éste genere una fuerza ascendente, se obtenga un desplazamiento vertical el cual es medido por el sensor infrarrojo ubicado en la parte inferior del banco.

Como se puede observar en la Tabla 2, para la función de sensor distancia se utilizó un sensor infrarrojo SHARP GP2Y0A02YK (Ver Anexo 2) con el fin de tomar la medición de la altura del multirrotor y realizar la retroalimentación al sistema de control.

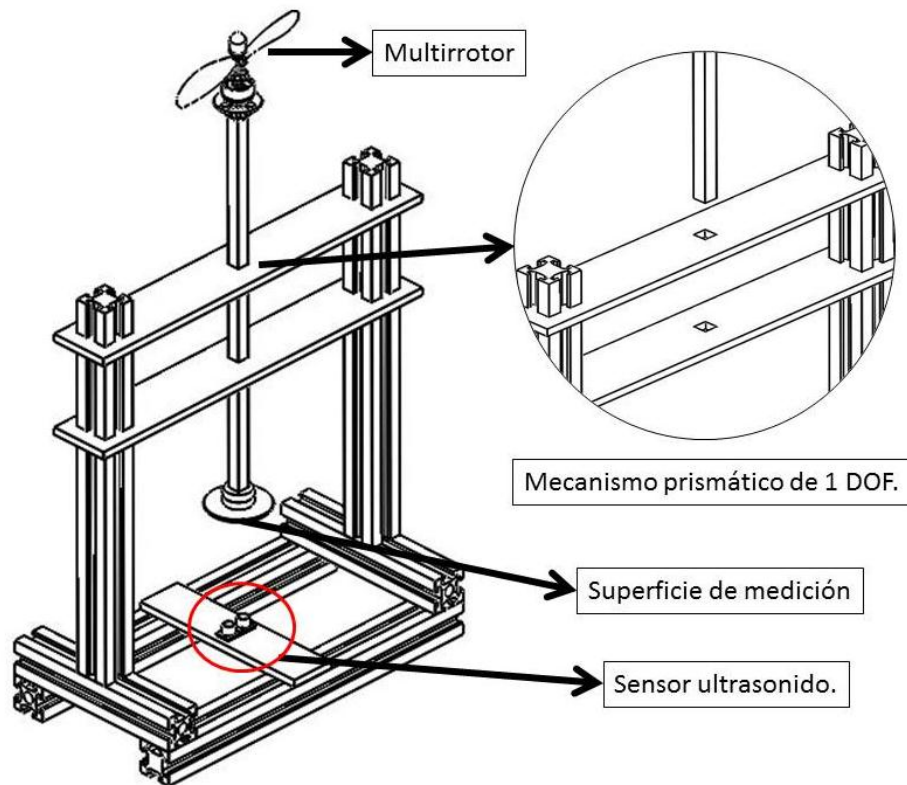
Para la función de procesar la información obtenida por medio de los sensores, ejecutar el algoritmo de control y por ultimo tomar la acción de control, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (DAQ) en conjunto con un Microcontrolador Arduino Mega 2560, debido a que este microcontrolador presenta una buena relación costo/beneficio, ofreciendo la posibilidad de tener 54 pines digitales de los cuales 16 pueden ser usados para PWM, además de que trabaja a una frecuencia de 16 MHz y a un voltaje de 5V (Arduino, 2015), lo que hace posible su alimentación por medio de un computador, evitando así tener una fuente eléctrica adicional.

- **Segunda alternativa de diseño para el desplazamiento del multirrotor:**

A continuación se presenta el segundo prototipo construido y empleado para la validación del mecanismo de movimiento vertical del multirrotor.

<b>Función</b>	<b>Elemento Portador de Función</b>
Posicionamiento del banco	Manualmente por el usuario
Posicionamiento del multirrotor	Manualmente por el usuario
Alimentación de componentes electrónicos	Fuente variable BK PRECISION 0-30V, 0-30A
Sensar distancia	Sensor de ultrasonido Parallax
Procesamiento de información	Microcontrolador Arduino Mega 2560
Restricción de grados de libertad	Mecanismo prismático

**Tabla 3. Composición de alternativa de diseño 2.**



**Figura 24. Opción de diseño 2 (Mesa Tabares, 2014).**

Como se puede ver en la Tabla 3 y en la Figura 24, existen algunas diferencias entre las alternativas de diseño uno y dos. La primera de ellas es la sustitución del sistema de guías utilizado en la alternativa uno para la restricción de los grados de libertad del multirrotor, por el mecanismo prismático de un solo grado de libertad (DOF) que se observa en esta figura. Este mecanismo permite que al generar una aceleración ascendente o descendente del multirrotor este pueda tener un desplazamiento vertical de un solo grados de libertad, el cual es medido por el sensor de ultrasonido en la parte inferior del banco y la superficie de medición.

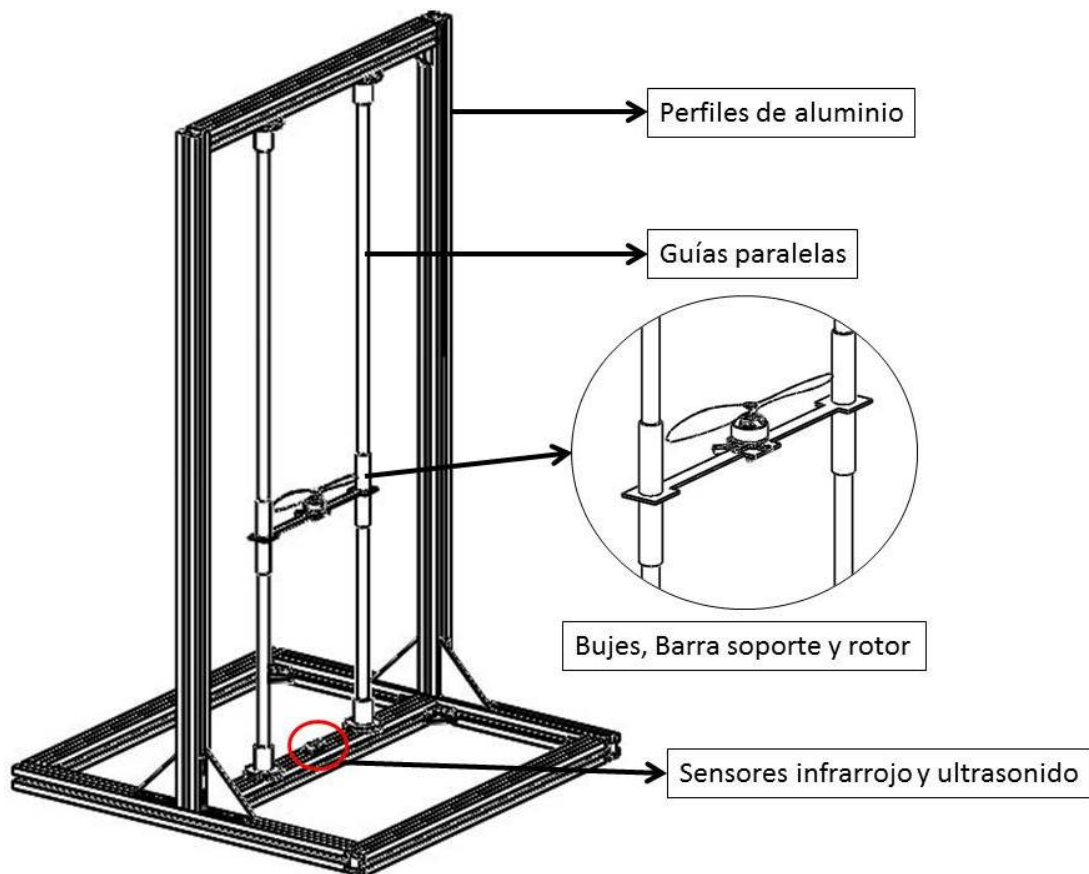
La segunda diferencia, es que para el procesamiento de la información se utilizó únicamente el Microcontrolador Arduino, lo cual permitió tener una respuesta más rápida y así tener un control más preciso del sistema, ya que la interfaz por medio de Labview es un proceso extra que afecta el tiempo de reacción del sistema de control. Esta alternativa cuenta además con un sensor de ultrasonido en lugar del sensor infrarrojo de la alternativa anterior.

- **Tercera alternativa de diseño para el desplazamiento del multirrotor:**

A continuación puede verse el tercer prototipo que se construyó para realizar la validación del movimiento vertical del multirrotor a partir de la matriz morfológica.

<b>Función</b>	<b>Elemento Portador de Función</b>
Posicionamiento del banco	Manualmente por el usuario
Posicionamiento del multirrotor	Manualmente por el usuario
Alimentación de componentes electrónicos	Fuente de corriente directa de computador
Sensar distancia y rotación	Sensores infrarrojo, ultrasonido e IMU
Procesamiento de información	Microcontrolador Arduino Mega 2560
Restricción de grados de libertad	Guías cilíndricas paralelas

**Tabla 4. Composición de alternativa de diseño 3.**



**Figura 25. Alternativa de diseño 3.**

Para este diseño se implementó un mecanismo de barras paralelas de 1 grado de libertad como guías de movimiento del multirrotor como se ve en la Figura 25, ya que en este sistema es posible utilizar bujes o rodamientos lineales con el fin de reducir la fricción y así obtener un sistema más similar al real, en el cual se presenta poca fricción a bajas velocidades.

Este diseño como se observa en la Tabla 4, a diferencia de las dos opciones anteriores, cuenta con un sensor de ultrasonido adicional para la medición de la altura del multirrotor. Esto se debe a que el sensor infrarrojo presenta un comportamiento no lineal y su rango de trabajo va desde 20 cm hasta 150 cm de altura (Ver Anexo 2), además de esto sus mediciones de altura son poco precisas ( $\pm 10\text{cm}$ ). Debido a esto, se implementó este sensor de ultrasonido, el cual posee un rango de funcionamiento de 2 cm a 300 cm y presenta mediciones de altura más precisas ( $\pm 3\text{cm}$ ).

De esta forma el banco de pruebas puede tomar dos mediciones de altura simultáneas por medio de los sensores con el fin de realizar una comparación entre las dos medidas, lo cual le permite obtener un valor más preciso de la altura del multirrotor ( $\pm 3\text{cm}$ ) y tener un diseño más robusto del banco de pruebas.

## • Selección de la alternativa de diseño

Luego de realizar diferentes pruebas de validación para el desplazamiento vertical de cada una de los tres mecanismos, con el fin de verificar que estos permitieran un desplazamiento del multirrotor libre de atascamientos y con poca fricción, principal requerimiento para la realización de las pruebas de control, se obtuvieron los siguientes resultados.

- **Alternativa 1**

A pesar de que el mecanismo utilizado en este diseño permitió la restricción de los grados de libertad necesarios y el desplazamiento vertical del multirrotor, éste fue descartado principalmente por dos razones, la primera es que al utilizar los canales de los perfiles de aluminio como guías para restringir el movimiento del multirrotor (Ver Figura 23), se presenta una fricción considerable entre el canal y las guías, la cual puede llegar incluso a generar atascamientos del sistema y a no permitir la obtención de una buena aproximación al sistema real, en el cual la fricción a la que se somete el multirrotor es mínima. Adicionalmente, los multirrotores son sistemas bastante inestables y que necesitan acciones de control rápidas, y al utilizar Labview como interfaz hombre máquina y Arduino para el procesamiento de información, el tiempo de respuesta puede afectar el control del multirrotor.

- **Alternativa 2**

Gracias al cambio de mecanismo utilizado para la restricción de los grados de libertad y el movimiento del multirrotor, se logró disminuir la fricción del sistema debido a la reducción de aproximadamente un 60% del área de contacto con respecto a la alternativa uno. Sin embargo este diseño tiene una gran limitante que es el posible recorrido vertical u horizontal del multirrotor, ya que éste se reduce considerablemente y de acuerdo con las especificaciones del PDS, el banco debe permitir un desplazamiento vertical del multirrotor de 1.4 metros y su altura máxima no debe superar los 1.6 metros. Además, debido a su configuración este mecanismo no permite ningún tipo de variación para los ángulos de *Pitch* y *Roll* ni el desplazamiento horizontal del multirrotor, lo cual no hace viable su implementación en este banco de pruebas.

- **Alternativa 3**

Por medio de esta alternativa de diseño fue posible disminuir la fricción del sistema gracias al diseño de los bujes del mecanismo de guías paralelas, los cuales permiten el uso de rodamientos lineales y disminuyen aún más el área de contacto entre las guías fijas y el sistema móvil. Este mecanismo de guías paralelas al igual que el de la primera alternativa, permite también un máximo aprovechamiento del espacio de trabajo y la implementación de diferentes restricciones cinemáticas para la obtención de los demás grados de libertad del multirroto.

Durante las pruebas de validación se pudo apreciar también, que este sistema presenta un mayor peso que los dos anteriores, lo que aumenta el consumo de potencia del multirroto y hace que el valor a partir del cual los motores pueden superar la fuerza ejercida por el peso del sistema y acelerar el multirroto sea más alto.

Finalmente, luego de realizar la validación de las tres alternativas de diseño para el banco de pruebas, se eligió la alternativa número tres como la mejor opción de diseño para continuar con la construcción del prototipo final. Esta decisión se tomó debido a que su mecanismo de desplazamiento permite tener un mayor espacio de prueba y un vuelo del multirroto sin atascamientos y con menos fricción que los diseños anteriores, además el uso de los dos sensores de distancia y el microcontrolador para la adquisición de datos y el procesamiento de la información, permiten obtener una acción de control rápida y precisa.

## 2.3 Corporificación y diseño de detalle

Una vez definido el mejor de los tres mecanismos para el desplazamiento del multirrotor y luego de haber observado el comportamiento de los diferentes sensores y equipos de adquisición de datos, se procedió con la implementación de los demás grados de libertad y la fase de diseño de detalle del banco de pruebas como se muestra a continuación.

Con el fin de identificar fácilmente los tipos de movimientos que permite este banco de pruebas y sus características, la Tabla 5 muestra todas las combinaciones de movimientos posibles que se pueden tener en el banco de pruebas. También se pueden ver el posicionamiento del banco requerido para cada prueba, los grados de libertad que permite este montaje y el código de identificación para cada combinación. Este último será implementado durante lo que resta del informe.

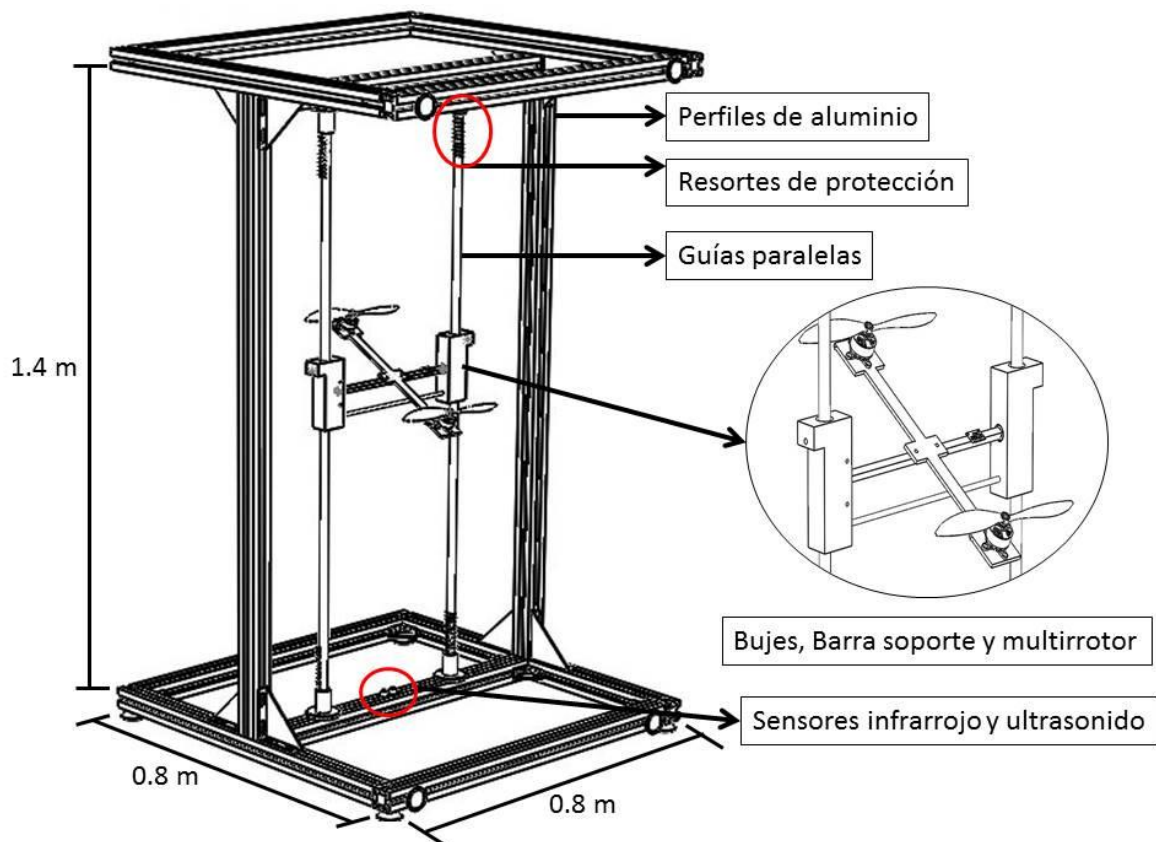
Movimiento del multirrotor	Posición del banco	Traslación			Rotación			D.O.F	I.D
		X	Y	Z	Pitch	Roll	Yaw		
Vertical	Vertical	-	-	✓	-	-	-	1	V.Z._
Pitch	Vertical	-	-	-	✓	-	-	1	V._.P
Roll	Vertical	-	-	-	-	✓	-	1	V._.R
Vertical + Pitch	Vertical	-	-	✓	✓	-	-	2	V.Z.P
Vertical + Roll	Vertical	-	-	✓	-	✓	-	2	V.Z.R
Horizontal	Horizontal	✓	-	-	-	-	-	1	H.X._
Roll	Horizontal	-	-	-	-	✓	-	1	H.R._
Horizontal + Pitch	Horizontal	✓	-	-	✓	-	-	2	H.X.P
Horizontal + Roll	Horizontal	-	✓	-	-	✓	-	2	H.Y.R
Vertical + Pitch + Yaw	Vertical	-	-	✓	✓	-	✓	3	V.Z.P.Y
Vertical + Yaw	Vertical	-	-	✓	-	-	✓	2	V.Z.Y
Yaw	Vertical	-	-	-	-	-	✓	1	V._.Y

**Tabla 5. Combinaciones posibles de movimientos y sus DOF's.**



En las tres últimas filas de esta tabla, se pueden observar tres combinaciones de movimientos en las cuales se incluye el grado de libertad para el Yaw. Sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto no se tratarán estas combinaciones ya que el mecanismo que permite este movimiento no será implementado aun en el banco de pruebas. Aun así, estas se mencionan en la tabla de combinaciones ya que son movimientos posibles que se pueden lograr en un futuro.

En la Figura 26 se presenta el prototipo del banco de prueba luego de haber implementado los diferentes mecanismos para lograr el número de grados de libertad requeridos y la instrumentación necesaria para la realización de las pruebas de control.

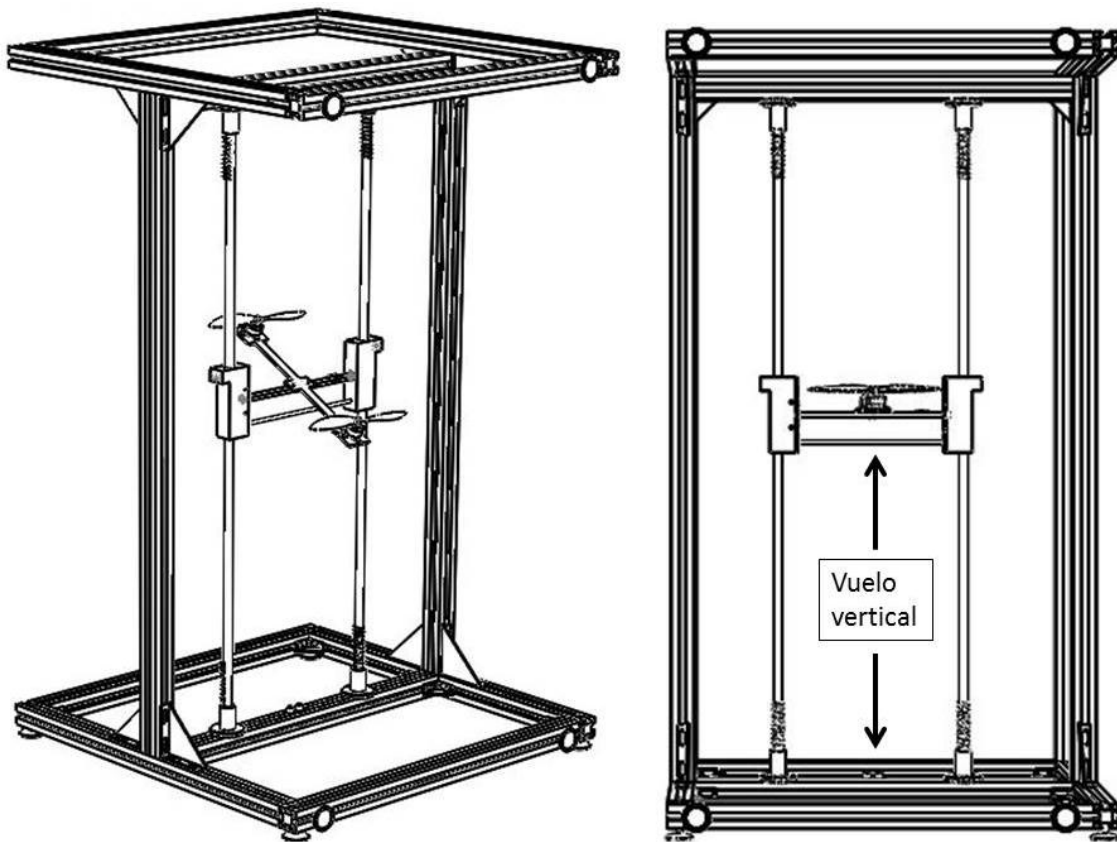


**Figura 26. Diseño final del banco de pruebas.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de esta fase de diseño de detalle para cada uno de los grados de libertad que debe permitir el banco de pruebas al multirrotor, además se presentan los diferentes sistemas de protección del banco y la instrumentación implementada.

- **Movimiento vertical (V.Z.).**

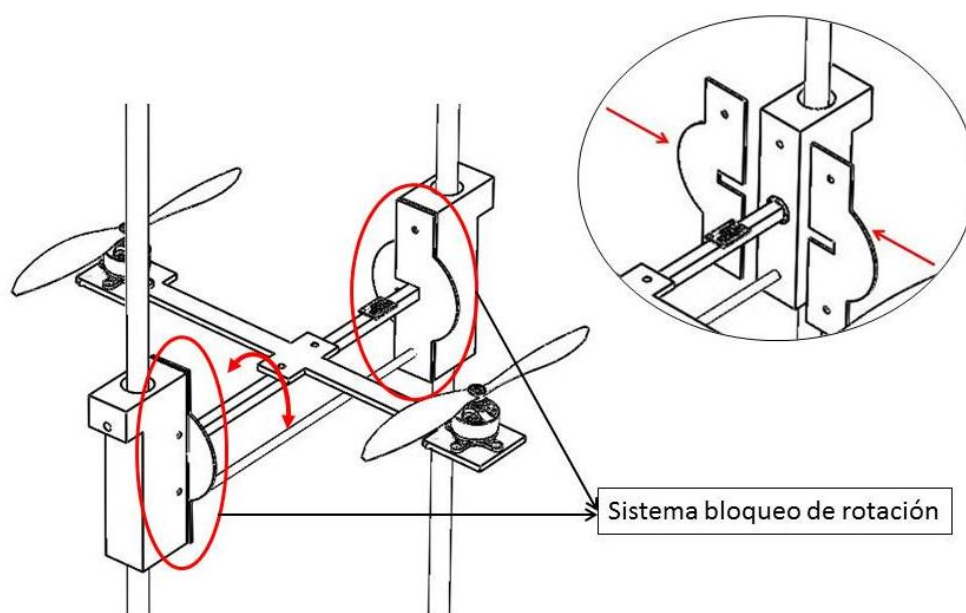
Como se mencionó anteriormente, para limitar el movimiento del multirrotor a un solo grado de libertad y facilitar las pruebas de control de altura, se utilizaron como guías paralelas dos barras de acero inoxidable rectificadas con un diámetro de 16 milímetros. Éstas en conjunto con los bujes de nylon, conforman una junta cilíndrica que impide que el multirrotor realice algún movimiento en un eje diferente al eje Z (V.Z.).



**Figura 27. Sistema de movimiento vertical (V.Z.).**

En la Figura 27 se puede observar el sistema de barras paralelas descrito anteriormente. Asimismo, tanto en esta figura como en la Figura 25 es posible apreciar el diseño de los dos bujes, los cuales gracias a su geometría permiten alojar dos rodamientos lineales NTN KH1630, uno en cada uno de sus dos extremos. Esto permite una reducción en la fricción del sistema ya que el contacto entre el buje y la guía se da solo en los dos extremos donde se ubican los rodamientos lineales. Ver características del buje en el Anexo 5.

Adicionalmente, este diseño permite la implementación de un sistema de bloqueo para la rotación del multirrotor como el descrito en la Figura 28, el cual garantiza que la fuerza de empuje producida por los motores se encuentra completamente vertical y que no está siendo utilizada para realizar trabajo en ninguna otra dirección.



**Figura 28. Sistema de bloqueo de rotación Pitch/Roll.**

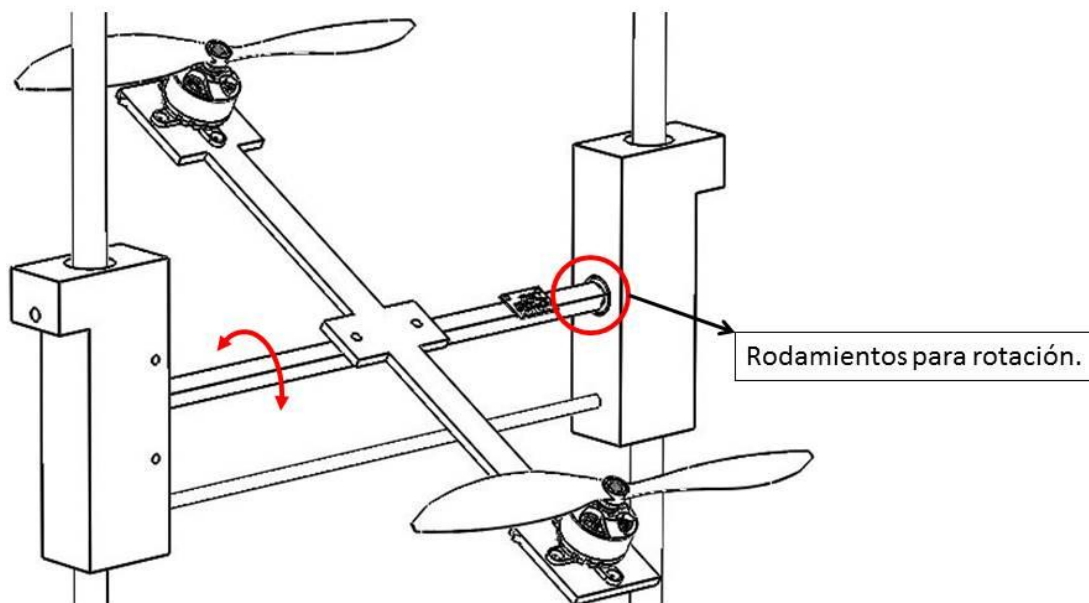
Este sistema se compone de cuatro dispositivos contruidos en acrílico de 3mm de espesor cortadas por láser, los cuales se ensamblan con los bujes por medio de cuatro tornillos M5x20 que permiten el desensamble del sistema en el momento que

el usuario lo desee o debido al tipo de prueba a realizar. Estos dispositivos aprovechan la sección transversal cuadrada de la barra de soporte de 10mm x10mm para bloquearla e impedir la rotación del multirrotor en caso de que se deseen realizar pruebas V.Z.\_.

- **Rotación (V.\_.P / V.\_.R):**

Debido a que en este banco de pruebas se podrán realizar ensayos de actitud de multirrotores, bien sea para cada uno de sus grados de libertad de forma individual, como para varios grados de libertad simultáneamente como se muestra en la Tabla 5, el banco debe permitir diferentes tipos de movimientos.

Para el caso de los ángulos *Pitch* y *Roll*, la barra de soporte donde se ubica el multirrotor (Figura 25) se apoya sobre dos rodamientos ubicados en las caras internas de los bujes, lo cual le permite a esta barra girar sobre su propio eje (Ver Figura 29). De esta forma el multirrotor tiene la posibilidad de girar solidario a esta barra, permitiendo así realizar pruebas de control de *Pitch* o *Roll*.

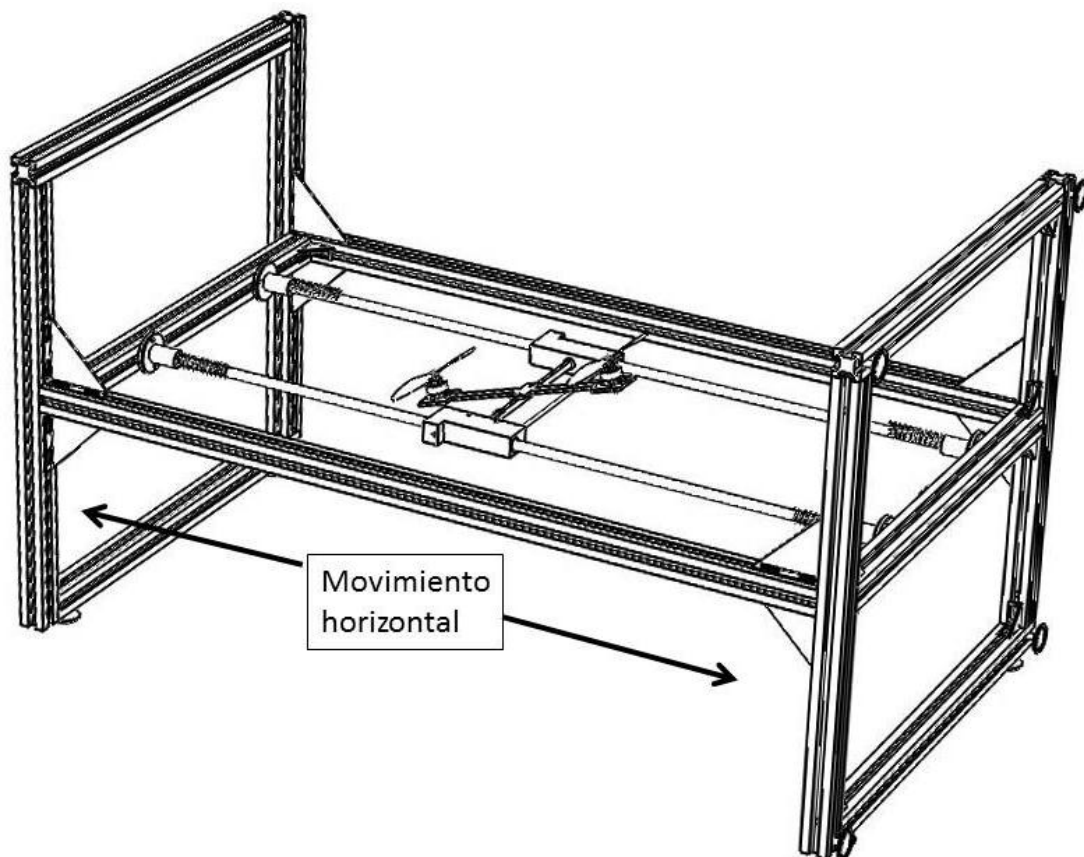


**Figura 29. Sistema de rotación (V.\_.P / V.\_.R).**

- **Movimiento horizontal (H.X.\_ / H.X.P):**

Debido a que uno de los objetivos de este banco es que sea fácil de manipular y no tenga un gran tamaño (Ver Anexo 1). Éste se diseñó de forma que el sistema de desplazamiento horizontal fuera el mismo que el utilizado para el vuelo vertical, con la diferencia de que para éste el banco de pruebas debe ser rotado 90° y apoyado sobre las cuatro patas para movimiento horizontal como se observa en la Figura 31.

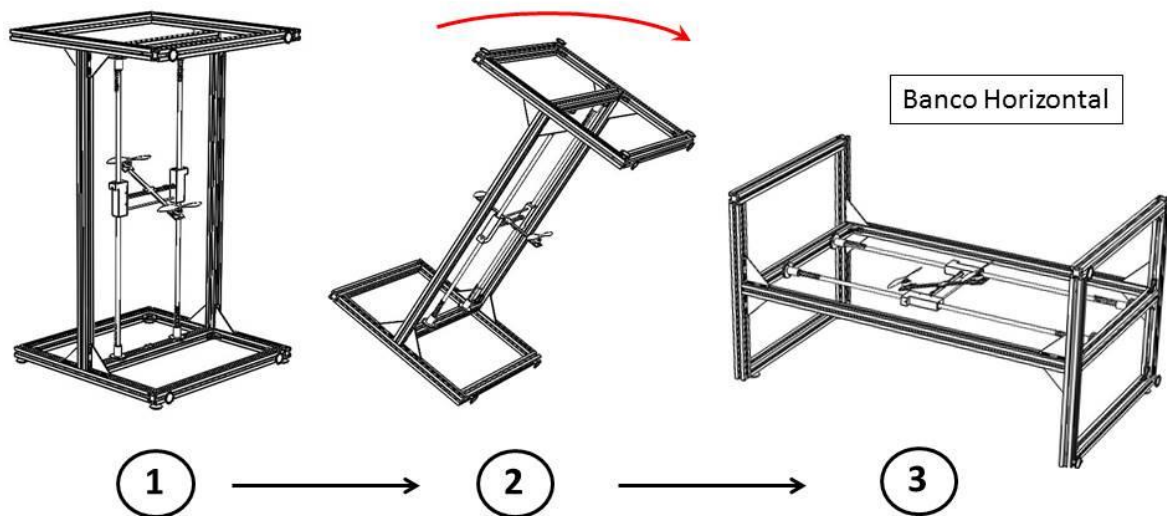
Esta rotación es posible lograrla por medio de una o dos personas, las cuales deben realizar una fuerza sobre la parte superior del banco de pruebas tomando las precauciones necesarias, ya que las dimensiones de 1.6 m x 1m y su peso menor a 15 Kg permiten esta manipulación.



**Figura 30. Desplazamiento Horizontal (H.X.\_ / H.X.P).**

En la Figura 30 puede verse el sistema ubicado de manera horizontal como se mencionó anteriormente. Aquí se puede observar que el mecanismo que permite el movimiento horizontal son las mismas guías paralelas y bujes utilizados en el vuelo vertical.

La diferencia al tener el banco ubicado de esta forma, es que cuando el multirrotor realiza una rotación, éste adquiere una aceleración horizontal paralela a las guías, la cual causa un desplazamiento en este sentido y por medio de los sensores de ultrasonido e infrarrojo utilizados para medir la altura vertical se puede realizar un control de distancia horizontal.

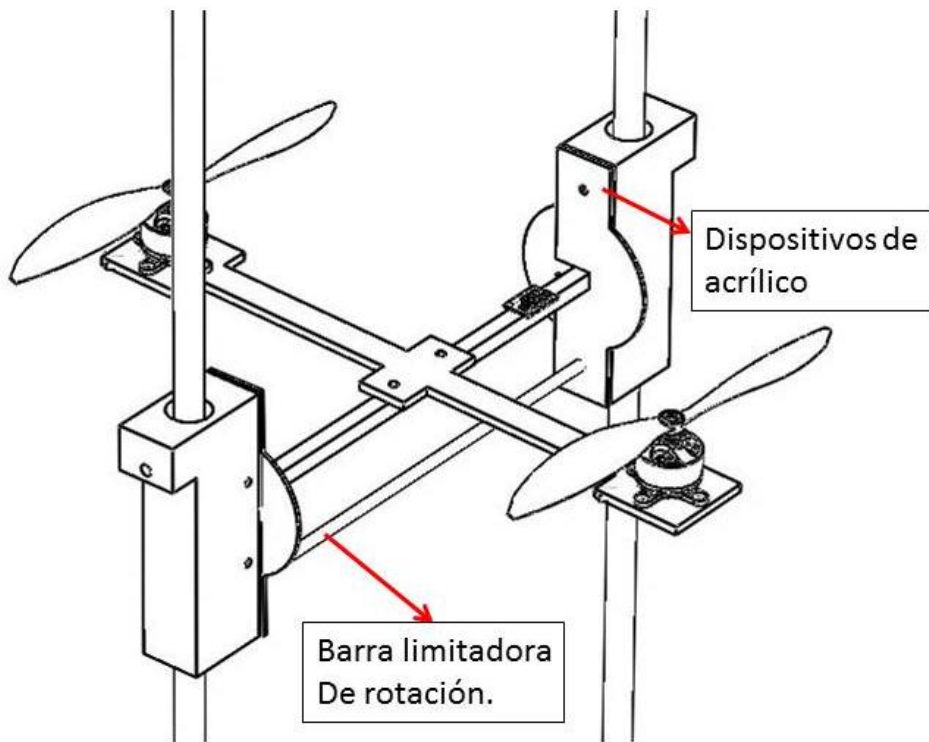


**Figura 31. Posicionamiento del banco para vuelo horizontal.**

- **Límites de desplazamiento:**

Debido a que los principales usuarios de este banco de pruebas serán integrantes de la comunidad estudiantil e investigativa de la universidad EAFIT, éste debe permitir que las pruebas se lleven a cabo de manera controlada tratando de evitar

cualquier daño tanto del multirrotores como del banco de pruebas y principalmente evitando cualquier daño físico a los usuarios, ya que como se mencionó anteriormente, este es un sistema inestable y sensible en el que una pequeña variación en las variables de entrada del sistema o los parámetros de control, pueden causar grandes cambios en su comportamiento lo cual en muchas ocasiones puede generar accidentes, daños o pérdidas de los equipos.

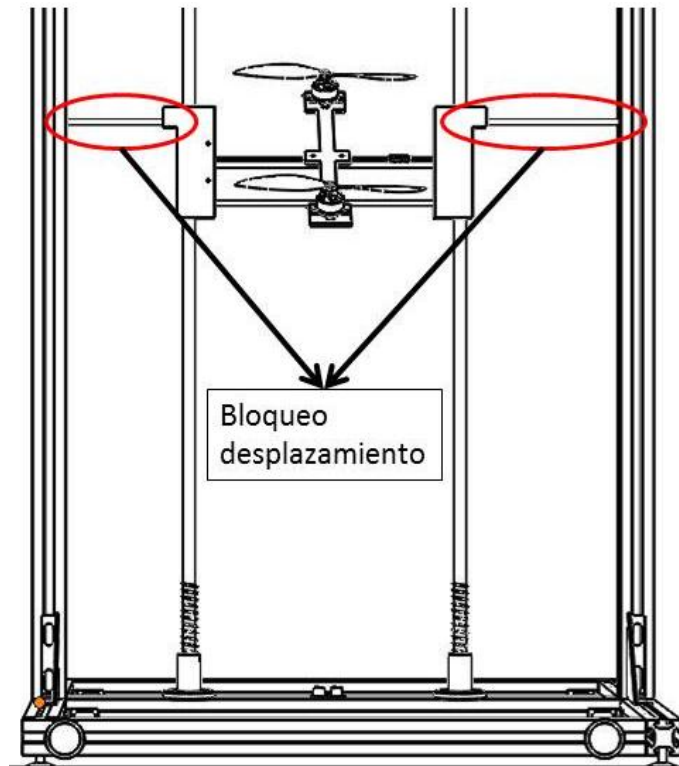


**Figura 32. Sistema de limitación de rotación.**

En la Figura 32 puede verse uno de los sistemas de seguridad instalados en el banco de pruebas, que permiten que los ensayos sean llevados a cabo con un riesgo mínimo para el usuario y el equipo.

Este sistema consta de una barra cilíndrica con un diámetro de 5 mm en la parte inferior de los bujes, la cual limita a máximo  $90^\circ$  el ángulo de rotación que puede alcanzar el multirrotores, ya que generalmente los ángulos de *Pitch* y *Roll* que alcanzan estos vehículos para realizar el vuelo horizontal, son menores a  $90^\circ$ .

Adicionalmente, en la Figura 33 se puede ver otro de los sistemas utilizados para limitar el movimiento del multirrotor, el cual está diseñado para restringir el desplazamiento horizontal y vertical del vehículo, permitiendo realizar pruebas para V.\_P, V.\_R y H.\_R (Ver Tabla 5).



**Figura 33. Sistema de bloqueo de desplazamiento.**

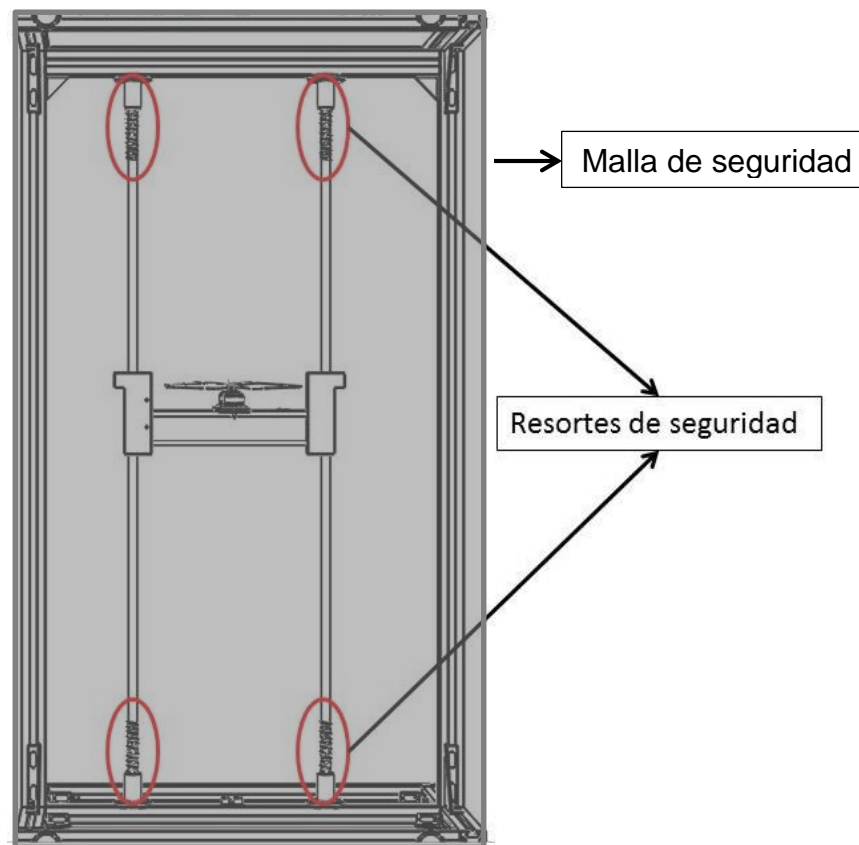
Este sistema consta de dos barras roscadas en uno de sus extremos, las cuales se fijan a un agujero con rosca M5 x 0.5 x 20 ubicado en el extremo superior de los bujes. Este sistema impide el desplazamiento del multirrotor, bien sea vertical u horizontal dependiendo de la posición del banco, lo cual hace posible realizar pruebas de rotación sin desplazamiento del vehículo. Esto le permite al usuario probar estrategias de control para *Pitch* (V.\_P) y *Roll* (V.\_R, H.\_R) manteniendo el multirrotor en un mismo lugar.



- **Sistemas de protección:**

Teniendo en cuenta la seguridad de los usuarios y que este banco contiene piezas como las hélices en movimiento a altas velocidades, el banco debe contar con protecciones suficientes para evitar lesiones y asegurar que los usuarios y las personas cercanas no sufran ningún daño en el momento en el que ocurra algún accidente.

Gracias a lo anterior, se hizo necesario tomar medidas de seguridad como las que se pueden observar a continuación.



**Figura 34. Malla de protección.**

En la Figura 34 se puede observar la protección principal del banco que consiste en una malla plástica, la cual evita que el multirrotor o alguna de sus partes sean proyectadas fuera del banco de pruebas.

Adicionalmente se tomó una medida de seguridad para evitar daños en el equipo que consta de 4 resortes en los extremos de las barras cilíndricas, ya que en ocasiones el multirrotor puede acelerarse y alcanzar el límite superior o inferior del banco de pruebas a altas velocidades.

De acuerdo a esto se seleccionaron 4 resortes de compresión que pudieran absorber esta energía como se muestra a continuación.

Teniendo en cuenta que la velocidad inicial del multirrotor es cero cuando este se encuentra en el extremo superior del banco a 1.4 metros de altura y asumiendo la aceleración de la gravedad como  $9.81 \text{ m/seg}^2$ , se obtiene que la velocidad en caída libre del multirrotor al momento de impactar con los resortes es la siguiente:

$$V_f^2 = V_o^2 + 2gh \quad (1)$$

$$V_f^2 = 0 + 2(9.81)(1.4)$$

$$V_f = 5.24 \text{ m/seg}^2$$

Conociendo esta velocidad y la masa del multirrotor, es posible calcular la energía cinética que lleva este en el momento del impacto y que debe ser absorbida por los resortes.

$$E_k = \frac{1}{2} (m)(V_f^2) \quad (2)$$

$$E_k = \frac{1}{2} (0.818)(5.24^2)$$

$$E_k = 11.23 \text{ J}$$

A partir de este valor de energía, sabiendo que la longitud del resorte sin compresión es de 10 cm y que su longitud solida es de 5 cm, se puede conocer la constante elástica del resorte por medio de la ecuación de energía potencial elástica y el teorema de conservación de la energía, asumiendo que la energía cinética que lleva

el multirrotor al momento del impacto será absorbida totalmente por el resorte en estos 5 cm de compresión.

$$E_{pe} = \frac{1}{2} (K)(\Delta X)^2 \quad (3)$$

$$K = \frac{2(E_{pe})}{\Delta X^2}$$

$$K = \frac{2(11.23)}{0.05^2}$$

$$K = 8984 \text{ N/m}$$

Pero como el impacto lo van a soportar dos resortes con iguales características, la constante elástica de cada resorte debe ser de la mitad de este valor ( $4492 \text{ N/m}$ ).

- **Fuentes de Alimentación:**

De acuerdo con el diseño seleccionado a partir del análisis morfológico, para la alimentación del banco de pruebas, tanto del multirrotor como de la sensórica se eligió una fuente eléctrica de corriente directa como la que usan los computadores.



**Figura 35. Fuente de computador de 12V y 18A (Magazine, 2015).**

Esta fuente fue seleccionada principalmente debido al amperaje que le es posible entregar para la alimentación de los motores, ya que cada uno de estos motores en

funcionamiento puede llegar a consumir hasta 18 Amperios (King, 2015), por lo que se hace necesario tener una fuente que supere o iguale este valor.

Debido a esto fue seleccionada una fuente de corriente continua la cual puede entregar 12 voltios y hasta 18 Amperios; suficiente para alimentar todo el sistema, ya que por precaución los motores operarán temporalmente a un 50% de su potencia.

Además, el banco cuenta con dos fusibles aéreos de corriente de 9 Amperios, uno para cada motor como se observó en la sección de metodología en la Figura 16. Esto tiene como fin limitar el consumo máximo de potencia de los motores a 108W y tener un límite de potencia que es independiente de la estrategia de control del usuario con el fin de prevenir accidentes.

- **Sensórica:**

Para la medición de las variables de interés de los usuarios, tales como desplazamiento vertical, horizontal y ángulos de rotación se instalaron tres sensores en el banco. El primero es un sensor de ultrasonido por medio del cual se realizan las mediciones de desplazamiento vertical y horizontal del multirrotor de acuerdo a la posición del banco de pruebas.



**Figura 36.** Sensor de ultrasonido PARALLAX Ping (Parallax, 2015).

Como se ve en la Figura 36, el sensor utilizado es un Parallax PING (Ver Anexo 3) el cual es un sensor bastante económico (USD \$30) y fácil de encontrar en caso de necesitar una reposición, además este es un sensor comúnmente utilizado en conjunto con el Microcontrolador Arduino, lo que permite encontrar una gran cantidad de información y soporte en internet acerca de su funcionamiento y programación.

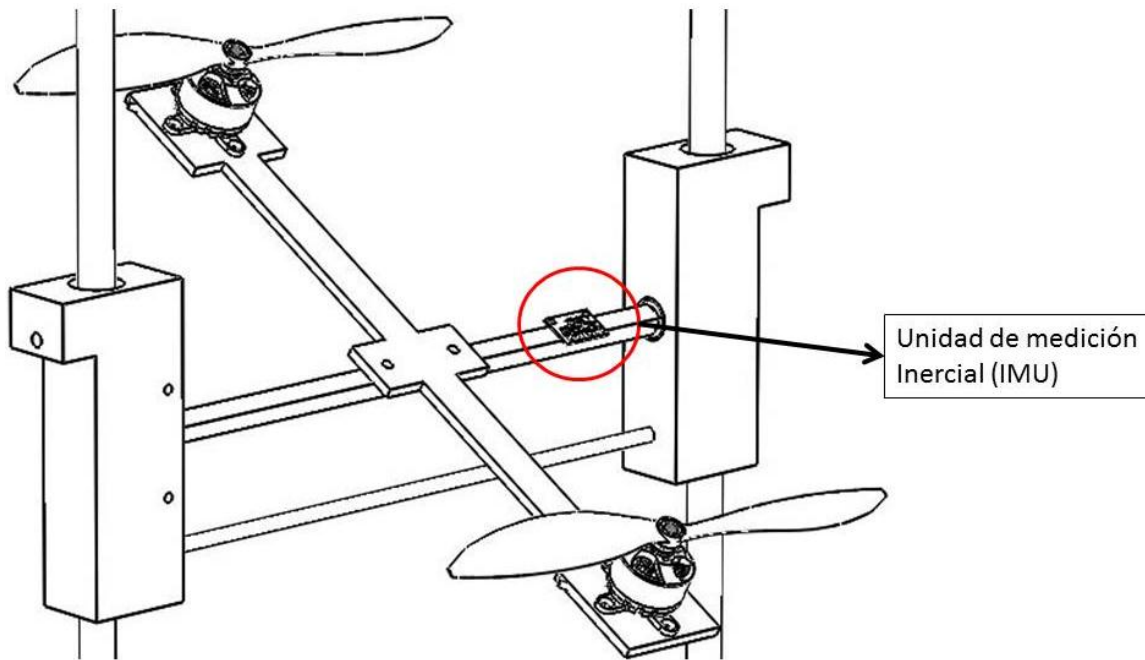
Adicional al sensor de ultrasonido, el banco también cuenta con sensor de uso opcional. Este sensor es una unidad de medición inercial (IMU) para el control de ángulos de giro y aceleraciones del multirrotores en sus 6 grados de libertad.

Al igual que para el sensor de ultrasonido, se seleccionó una ArduIMU V3 (Ver Anexo 4) la cual tienen como procesador un Arduino UNO, lo que la hace más sencilla de programar y permite tener un mayor soporte ya que también se usa comúnmente en conjunto con micro controladores Arduino.



**Figura 37. Unidad de medición inercial ArduIMU V3.**

Esta unidad de medición inercial se instaló en el la barra de soporte de motores del banco (Ver Figura 38) como un sensor opcional ya que en muchos casos el multirrotores o el equipo que se va a probar ya cuenta con su propia IMU o su propio sistema adquisición de datos, así que el usuario será quien decida cuál de estos sistemas utilizar o si utiliza ambos para obtener una mejor medición.



**Figura 38. Ubicación de la Unidad de medición inercial (IMU).**

Finalmente, el tercer sensor implementado en el banco de pruebas es un sensor infrarrojo SHARP GP2Y0A02YK (Ver Anexo 2) como el que se observa en la Figura 39.

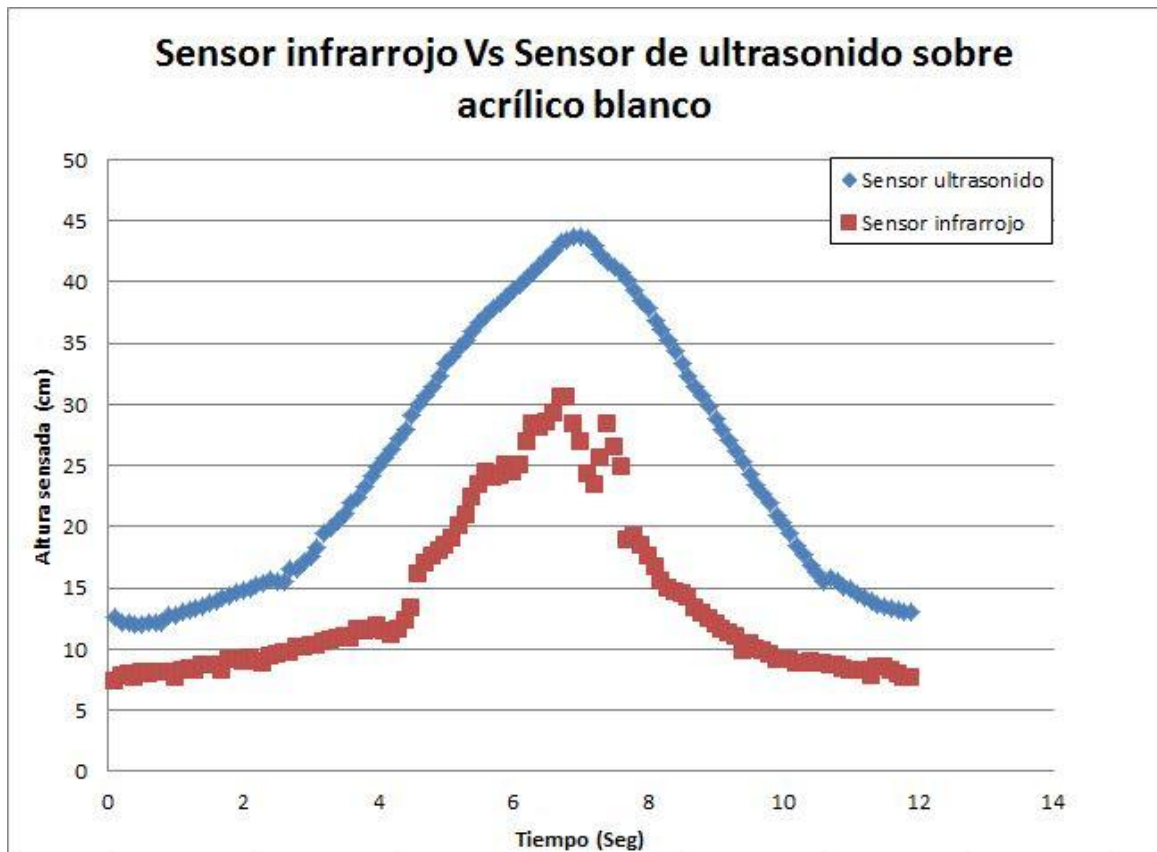


**Figura 39. Sensor infrarrojo SHARP GP2Y0A02YK (Vincent Abry, 2010).**

Éste al igual que el sensor de ultrasonido es un sensor económico (USD \$40), el cual es fácil de conseguir y es comúnmente utilizado en conjunto con los microcontroladores Arduino.

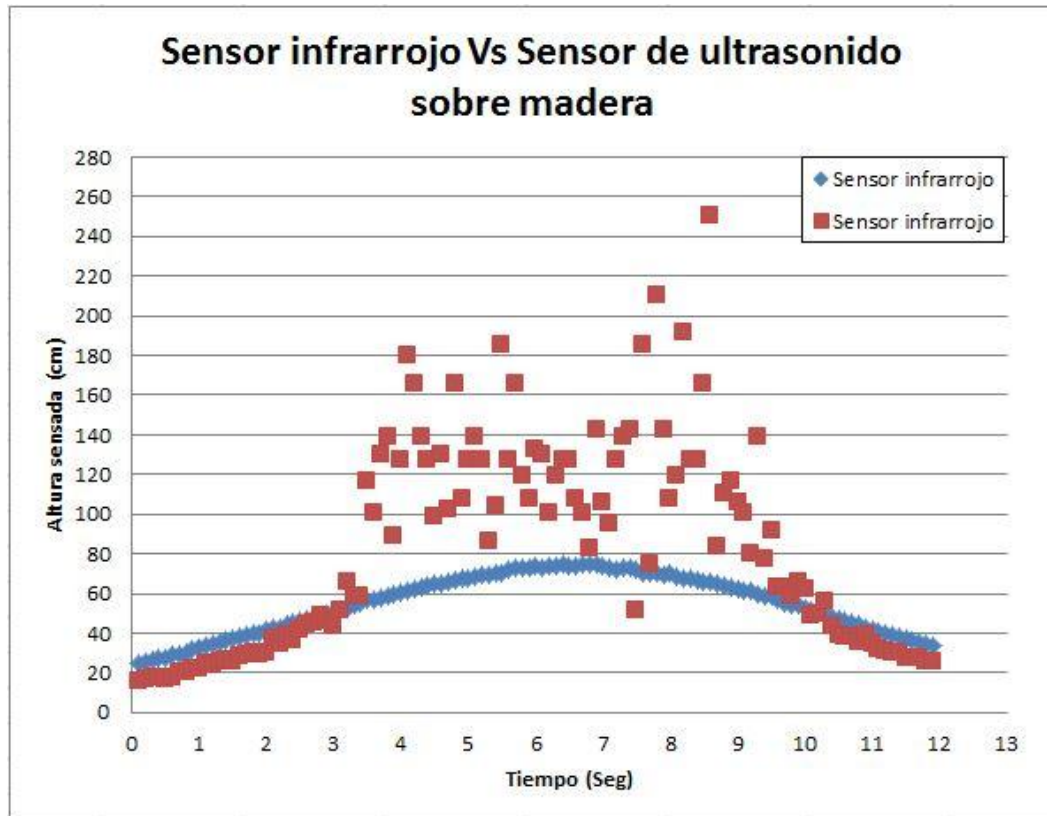
- **Caracterización de la sensórica**

En la Figura 40, se puede observar el comportamiento tanto del sensor de ultrasonido como el infrarrojo durante la primera prueba de altura. Como se puede ver, para esta prueba se desplazó el multirrotor verticalmente y se tomaron mediciones de su altura cada 100 milisegundos.



**Figura 40. Medidas de altura con ambos sensores sobre acrílico blanco.**

En esta gráfica se puede observar que los datos obtenidos por medio del sensor de ultrasonido poseen menos ruido que los tomados por el sensor infrarrojo y que la diferencia entre ambas mediciones de altura es de aproximadamente 12 centímetros.



**Figura 41. Medidas de altura con ambos sensores sobre madera.**

En la Figura 41 se puede ver que el comportamiento del sensor de ultrasonido es similar al obtenido en la primera prueba utilizando la placa de acrílico blanco, en esta se puede observar nuevamente que la medición del sensor infrarrojo contienen más ruido, y se observa también que a distancias mayores a 0.6 metros, la diferencia entre ambas medidas puede ser aún mayor a 12 centímetros.

Por último, luego de comparar algunas de estas mediciones de altura, fue posible observar que las mediciones realizadas por el sensor infrarrojo presentaban una



precisión de  $\pm 13\text{ cm}$ , mientras que las realizadas por el sensor de ultrasonido presentaban una precisión de  $\pm 3\text{ cm}$ .

Finalmente por parte del sensor infrarrojo se pudo ver que este presenta una cantidad considerable de ruido y en ocasiones una baja precisión, además de que puede ser afectado por diversos factores como la luz solar. Por el contrario, el sensor de ultrasonido permitió la obtención de mediciones con una baja cantidad de ruido y una buena precisión, aunque debido a su mecanismo para la medición de distancia, en ocasiones este se vió afectado debido a la detección de objetos diferentes al multirrotor como por ejemplo los cables de alimentación de los motores.

## **2.4 Pruebas y validación del prototipo**

En la Figura 42 se puede observar el prototipo fabricado a partir de la información recopilada en la etapa de diseño conceptual.



**Figura 42. Prototipo real del banco de pruebas.**

En esta figura se puede apreciar la ubicación de los diferentes mecanismos de movimiento para los distintos grados de libertad y algunos de los sistemas de bloqueo y protección tal y como se describió en la etapa de diseño de detalle.

Una vez terminada la construcción de este prototipo y continuando con la metodología descrita anteriormente, a continuación se pueden observar los

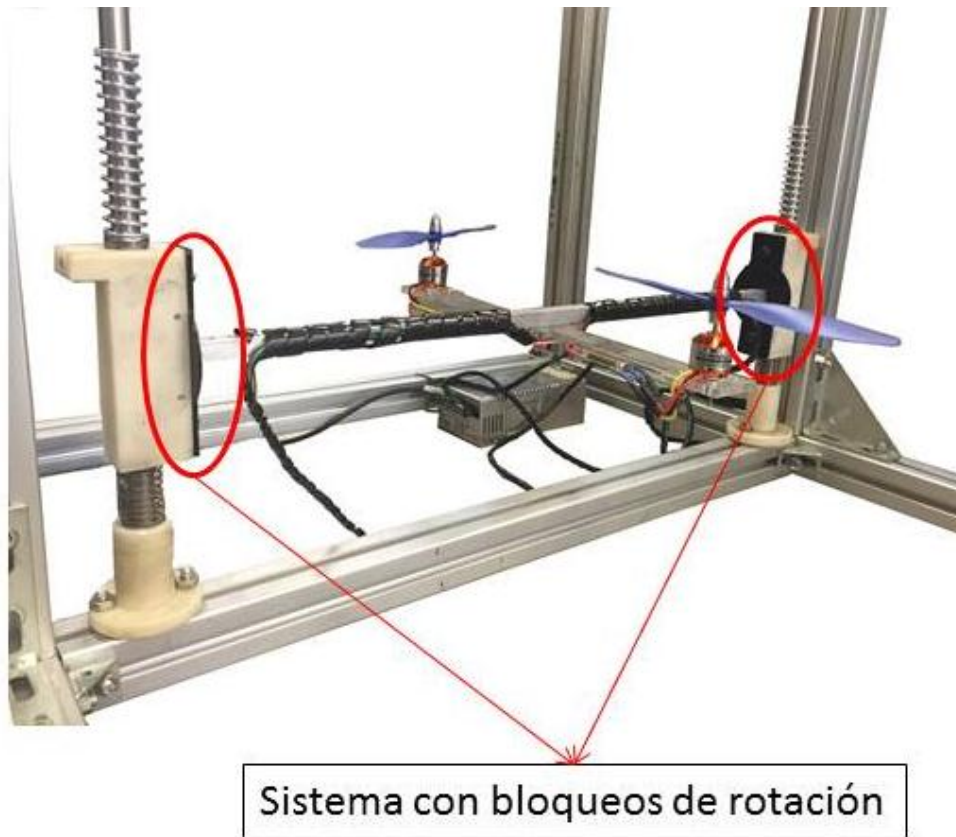
resultados de las pruebas de validación de los diferentes sistemas del banco de pruebas.

- **Sistema de vuelo vertical (V.Z.\_):**

A partir de esta prueba, se observó que la fuerza de sustentación ejercida por los dos motores alcanza el punto de equilibrio con respecto al peso del multirrotor, cuando la señal de servo ingresada a los motores llega a las 88 unidades aproximadamente (48.8% del periodo total de la señal PWM). A partir de este punto, el multirrotor comienza a generar una aceleración vertical con una variación de la señal de servo de tan solo 3 unidades (1.66% del periodo total de la señal PWM), permitiéndole al multirrotor tener un rango 51.2% del periodo total de la señal de PWM para controlar su velocidad y posición.

Adicionalmente, por medio de esta prueba fue posible validar el buen funcionamiento tanto del sistema de guías y bujes como del sistema de bloqueo de rotación (*Pitch/Roll*), ya que para la realización de la prueba se hizo uso de este sistema como se observa en la Figura 43.

Gracias a esto pudo verificarse que este sistema es lo suficientemente robusto como para soportar los 2.21 N·m de torque máximos ejercidos por el sistema cuando uno de los motores se encuentra con cero potencia y el segundo motor se encuentra a su máxima potencia.



**Figura 43. Prueba de vuelo vertical con bloqueos de rotación.**

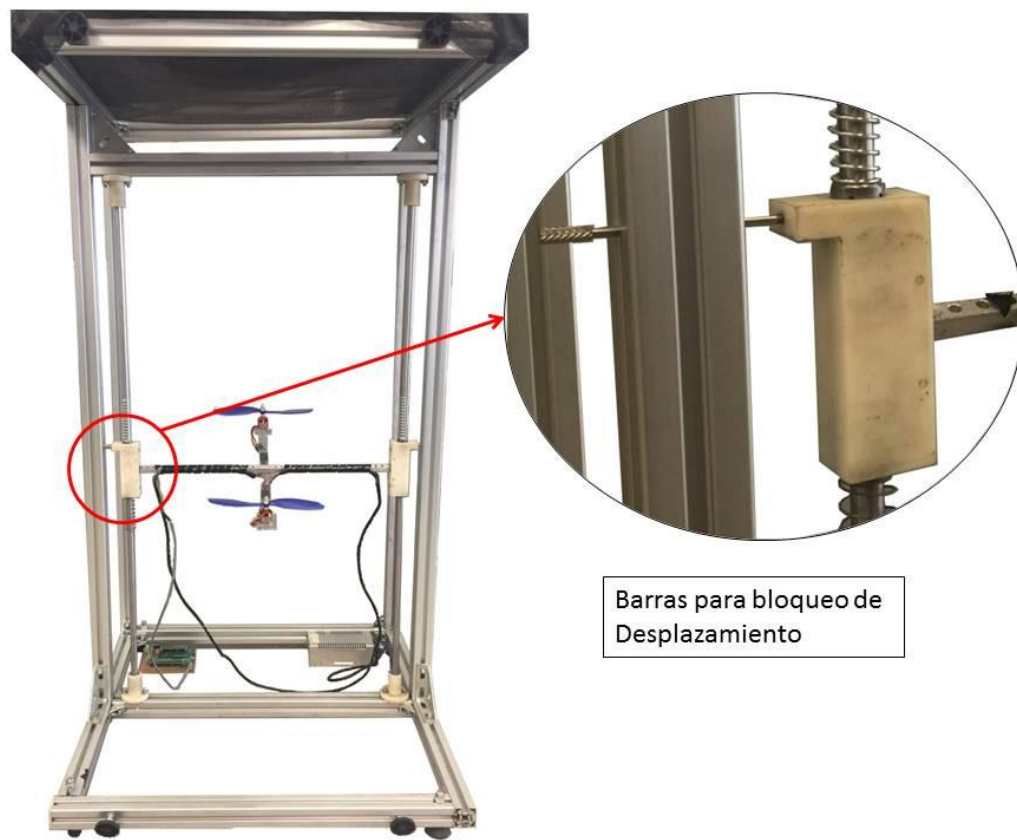
Además de estos resultados, también se pudo identificar que el peso de 1000 gr del sistema, correspondiente a los dos bujes y a la barra de soporte de los motores es un poco alto para los 2.2 Kg que pueden sustentar los dos motores operando a su máxima potencia (King, 2015), esto se debe a que en los momento en que el multirrotores desciende en caída libre, la fuerza requerida para elevarlo nuevamente puede alcanzar los 19 N (2Kg).

Por esta razón se instalaron en el banco 2 poleas de uso opcional, a las que se les puede añadir un lastre de 200 gr el cual contrarresta el exceso de peso añadido al sistema por los bujes y la barra de soporte, permitiendo así, que el peso soportado por los dos motores sea únicamente el del multirrotores. Esto permite que la fuerza de empuje generada por los motores trabajando al 50% de su potencia, sea suficiente para la realización de las pruebas de control.

- **Sistema de rotación (V.P.\_ / V.R.\_ / H.P.\_):**

Durante la realización de esta prueba, se pudo observar que para una diferencia de 2 unidades de la señal de servo aplicada a uno de los motores con respecto al otro, lo cual equivale a un 1.11% de la señal de servo total, el multirrotor adquiere una inclinación de aproximadamente 8 grados, esto evidencia la inestabilidad del sistema y la poca resistencia que presenta el banco ante este grado de libertad del multirrotor.

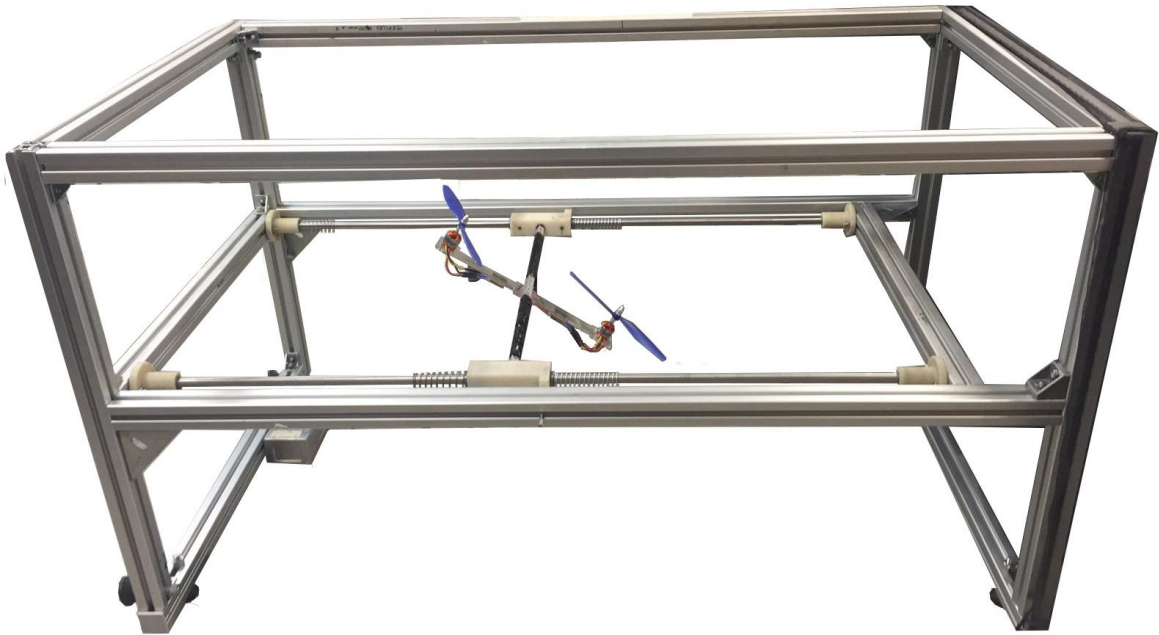
Adicionalmente, gracias a que para la realización de esta prueba se hizo uso del sistema de restricción de desplazamiento vertical y horizontal como se observa en la Figura 44, se pudo validar el buen funcionamiento de éste al no permitir ningún desplazamiento del multirrotor durante la prueba de rotación.



**Figura 44.**Banco con bloqueo para desplazamiento vertical.

- **Sistema de vuelo horizontal (H.X.P):**

Durante la realización de esta prueba, se observó un movimiento del multirrotor libre y sin atascamientos en el cual al igual que durante la prueba de rotación, ante una diferencia de dos unidades en la señal de servo entregada a los motores se observó una inclinación de 8 grados aproximadamente, lo cual es suficiente para generar una fuerza horizontal y una aceleración del sistema haciendo que este se desplace horizontalmente.



**Figura 45. Banco de pruebas en posición horizontal.**

- **Vuelo vertical con rotación (V.Z.P / V.Z.R):**

Luego de realizar la prueba de vuelo vertical con rotación, se observaron unos resultados y un comportamiento bastante similares a los obtenidos durante la prueba de vuelo horizontal debido a que el mecanismo utilizado durante ambas pruebas fue el mismo.

Durante ésta, se observó que el banco ejerce poca resistencia tanto al movimiento vertical como de rotación, manteniendo constante la sensibilidad del sistema descrita durante las pruebas de vuelo horizontal y de rotación.

A partir de las diferentes pruebas realizadas mediante este banco, fue posible observar que los diferentes mecanismos implementados para la obtención de los movimientos deseados del multirrotor presentaron un buen desempeño.

Estos permitieron al multirrotor un movimiento libre y con poca fricción para cinco de sus seis grados de libertad, lo que hace posible la validación de estrategias de control de actitud y desplazamiento de este tipo de vehículos para los siguientes movimientos.

- Vuelo vertical
- Vuelo horizontal
- Ángulo *Pitch*
- Ángulo *Roll*
- Vuelo vertical + *Pitch/Roll*

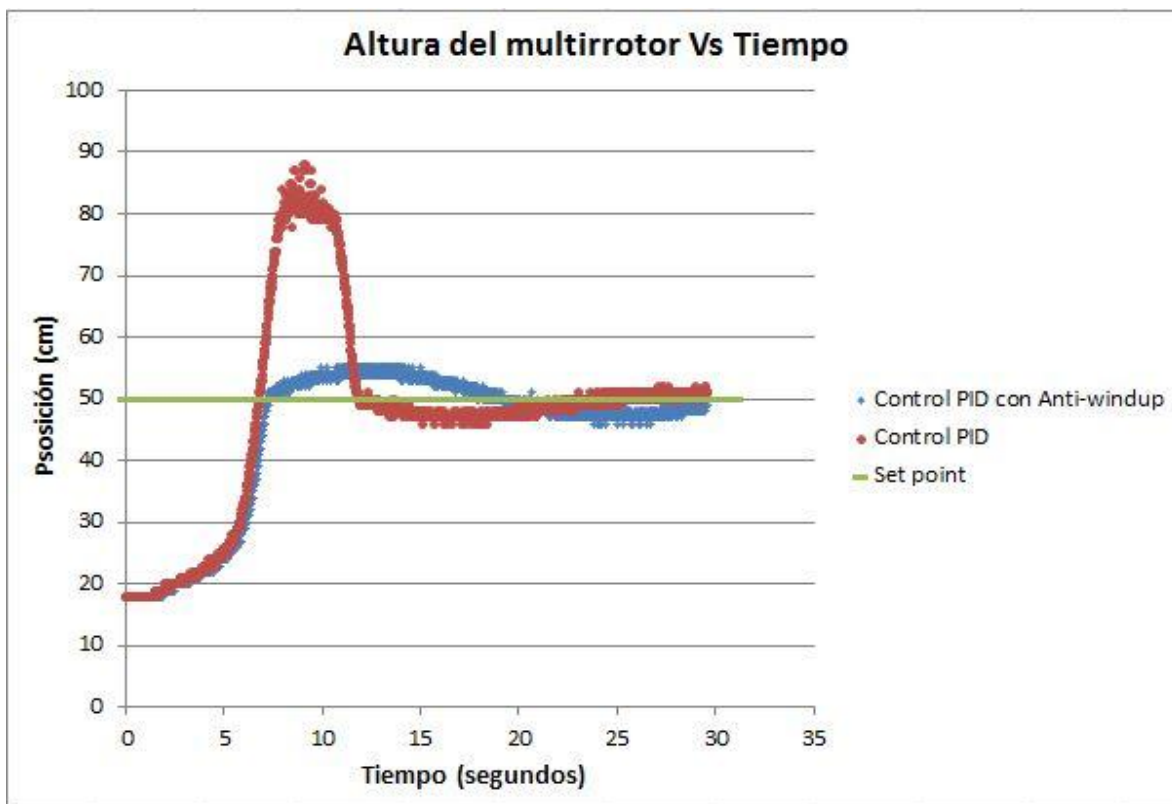
## **2.5 Validación de la electrónica y prueba de control de altura**

Una vez desarrollada la rutina de control PID para el vuelo vertical del multirrotor y luego de realizar algunas pruebas con el fin de optimizar esta estrategia, los valores obtenidos para las constantes de control luego de la sintonización manual fueron los siguientes.

- Constante proporcional ( $K_p$ ) = 1.1
- Constante integral ( $K_i$ ) =  $8 \times 10^{-3}$
- Constante derivativa ( $K_d$ ) = 0.8

Una vez obtenidos los valores de estas constantes, se procedió con la prueba de control obteniendo los resultados mostrados a continuación.

A partir de la Figura 46, se puede observar el comportamiento de la altura del multirrotor en función del tiempo al ingresar al sistema un setpoint de altura de 50 cm y desde una altura inicial de 20 cm.

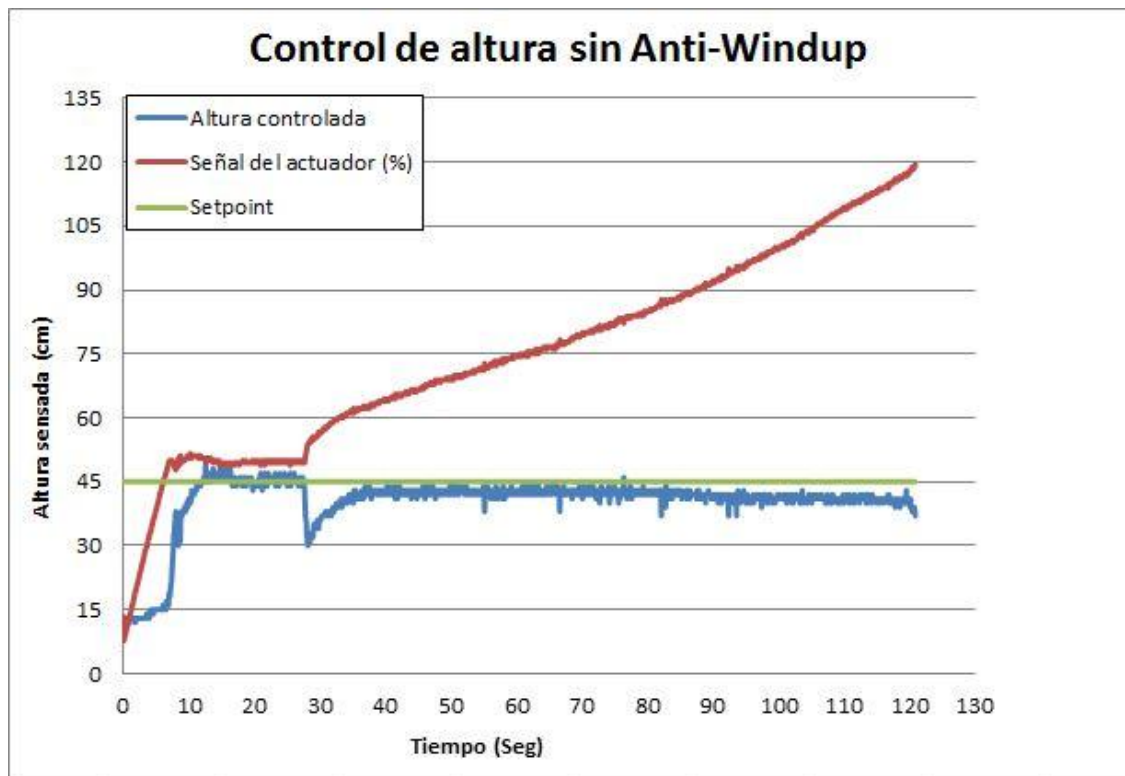


**Figura 46. Prueba de altura controlada por PID y PID con anti-windup.**

En esta figura, se puede ver el comportamiento del multirrotor controlado por medio de un PID simple y un control PID con anti-windup. En la curva del control PID simple, se puede observar que aunque el sistema se estabiliza alrededor del setpoint con poco error en estado estable, su sobre impulso es de alrededor de 30 cm, lo que equivale a un 60% del setpoint deseado.



En la Figura 47 se puede observar también el comportamiento de la acción de control enviada a los motores durante la prueba. Aquí se puede ver como la salida de servo enviada a los motores por medio del control PID simple aumenta indefinidamente a medida que transcurre el tiempo, superando incluso el 100% de la señal de servo admisible por los motores. Esto se debe a que la acción integral del control PID ( $K_i$ ), continúa acumulando error y modificando la acción de control sin importar cuál sea el estado del actuador, llegando a provocar incluso su saturación.

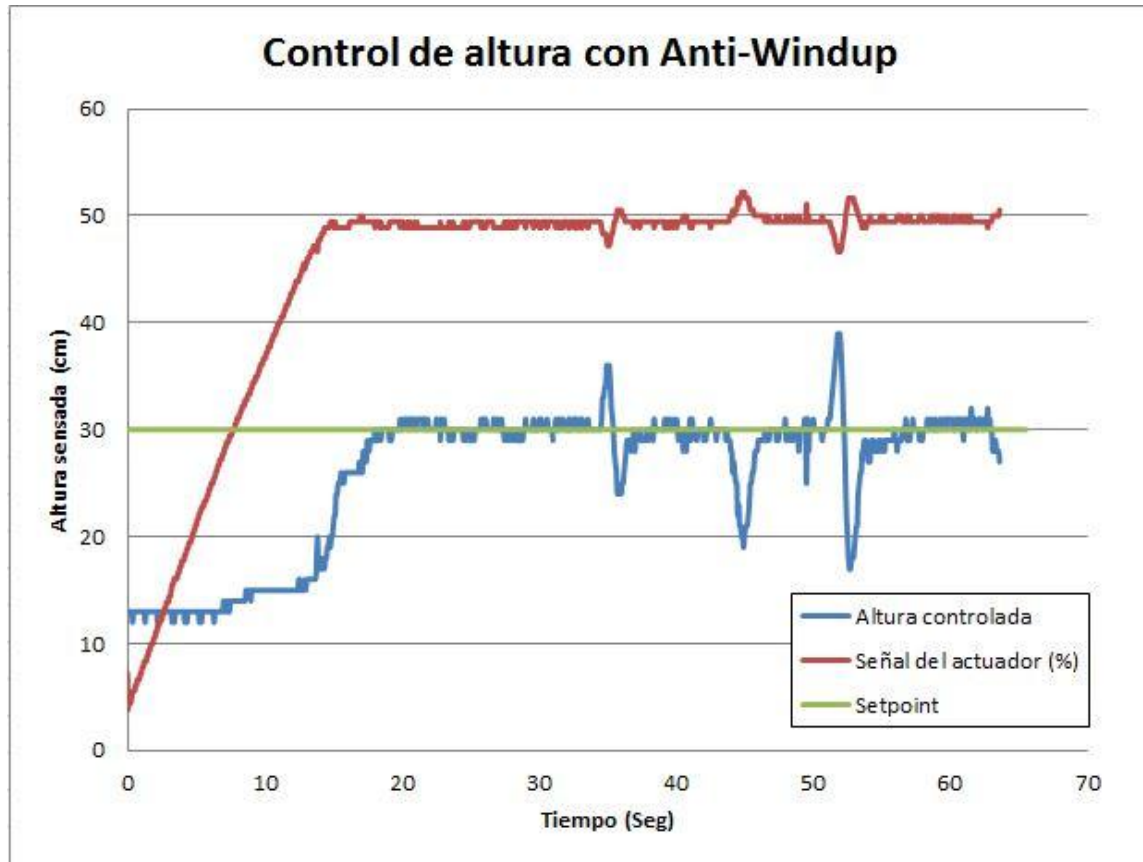


**Figura 47. Control PID de altura sin Anti-Windup.**

Es por esto que se implementó en la estrategia de control una herramienta conocida como anti-windup, la cual limita la acción integral del control PID anulándola cuando la acción total de control alcanza un valor determinado, el cual para esta prueba se

definió en 90 unidades de servo debido a que en este punto se alcanza el límite de corriente que puede entregar la fuente a los motores.

Esta herramienta evita una acumulación excesiva del error en el tiempo, lo cual puede disminuir significativamente los sobre impulsos del sistema y evitar la saturación de los actuadores.



**Figura 48. Control PID de altura con Anti-Windup.**

En la curva de control PID con anti-windup de la Figura 46 y la Figura 48, se puede observar el nuevo comportamiento del sistema al utilizar esta herramienta. En estas se puede ver que a diferencia del PID simple, el nuevo sistema presenta un sobre impulso de apenas el 10% con relación al setpoint definido por el usuario.

Adicionalmente, en la Figura 48 se puede ver un cambio significativo en el comportamiento de la señal de control enviada a los motores. En ésta se puede

observar que a pesar de las perturbaciones a las que se sometió el multirrotor durante la prueba, la acción de control nunca sobrepasó el 50% de la señal total de servo, lo que equivale a 90 unidades, que como se mencionó anteriormente es el punto a partir del cual se superan los 18A de corriente que puede entregar la fuente.

A partir de los resultados obtenidos durante la realización de esta prueba, además de validar la estrategia de control PID simple y PID con anti-windup, se pudo validar el buen desempeño de los componentes electrónicos del banco de pruebas, obteniendo una medición de altura del multirrotor con una precisión de  $\pm 3 \text{ cm}$  por parte de los sensores de infrarrojo y ultrasonido y un tiempo de respuesta adecuado para la ejecución de la acción de control por parte del microcontrolador. Esto permitió validar que tanto el diseño mecánico del banco como su instrumentación son aptos para la realización de pruebas de actitud y desplazamiento de multirrotores.

## **3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **3.1 Clarificación de la tarea**

A pesar de que fue posible recopilar una buena cantidad de requerimientos para el banco de pruebas a partir de la investigación de antecedentes y las preguntas a usuarios, hubiese sido de gran ayuda realizar entrevistas a personas expertas en el control de multirrotores con el fin de obtener una mejor aproximación al sistema real.

### **3.2 Diseño conceptual**

Debido a las dimensiones del banco de pruebas y a los mecanismos utilizados para el movimiento del multirrotor, el uso de este banco es recomendable durante etapas tempranas de control del vehículo, ya que su desplazamiento se encuentra limitado por los 1.4 metros de longitud de las guías paralelas, y la cantidad máxima de grados de libertad que se pueden probar de forma simultanea es de dos. Para obtener un banco que permita la realización de una mayor cantidad de pruebas con un grado de complejidad mayor, se podría pensar en la implementación de un mecanismo como el de la plataforma de Stewart el cual puede brindar al multirrotor un movimiento de seis grados de libertad de forma simultánea en lugar de individual como lo permite el banco desarrollado durante este proyecto. Esto permitiría realizar una prueba completa para el hover del multirrotor.

Además en cuanto a la metodología de Pahl & Beitz en la cual se basó el desarrollo de este proyecto, esta permitió conocer en detalle los requerimientos de diseño del banco de pruebas y brindo herramientas importantes que permitieron llevar a cabo

el proyecto de forma ordenada, convergiendo a una solución acorde con las especificaciones de diseño. Sin embargo, algunos de los pasos de esta metodología como lo fue la matriz morfológica no fueron aplicados correctamente, ya que para el caso particular de este proyecto esta fue implementada luego de la construcción del banco de pruebas, contrario a como lo indica la metodología. Esto hubiera permitido obtener algunos portadores de función diferentes para el diseño del banco de pruebas los cuales posiblemente podrían tener un mejor desempeño que los utilizados actualmente.

Finalmente, en cuanto a los sensores utilizados se obtuvieron buenos resultados a partir de su caracterización, sin embargo, se observó que tanto el sensor de ultrasonido como el sensor infrarrojo pueden presentar problemas de ruido y precisión en algunas ocasiones, lo cual puede afectar el desempeño de la estrategia de control. Una buena alternativa para las mediciones de desplazamiento del multirrotor podría ser la implementación de un sensor barométrico como los utilizados en gran parte de los controladores de vuelo comerciales.

### **3.3 Pruebas y validación del prototipo**

Debido a los mecanismos de desplazamiento y rotación implementados, este banco de pruebas no permite la realización de ensayos de control para el grado de libertad correspondiente al ángulo Yaw del multirrotor, por lo que no es posible realizar pruebas de control para la totalidad de los grados de libertad del sistema. Para esto podría pensarse en la utilización de un mecanismo esférico aprovechando de alguna manera la geometría de los bujes y así obtener una prueba de control más completa.

Adicionalmente, al realizar las pruebas de funcionamiento del banco se experimentaron algunos problemas durante la adquisición de los datos de altura debido a que los cables de señal y alimentación de los motores, pueden llegar a ubicarse entre los sensores de altura y el multirrotor causando una medición incorrecta. Debido a esto se debe pensar en algún sistema que pueda mantener los

cables alejados de la sensórica pero que a su vez permita un movimiento libre de los mismos. Una opción para esto podría ser la utilización de cadenetas porta cables como las utilizadas comúnmente en las máquinas de control numérico.

En cuanto al peso del sistema, se observó que este puede llegar a limitar las pruebas en las cuales se requiera de movimiento vertical ya que en algunas ocasiones los motores pueden superar la potencia máxima entregada por la fuente y causar que estos se queden sin alimentación durante la prueba. Esto puede evitarse mediante la implementación de una fuente de mayor potencia, sin embargo no se recomienda hacer esto en etapas tempranas de control del multirroto por protección del equipo.

Finalmente, se observó que el banco de pruebas presenta algunas vibraciones durante las pruebas de rotación debido al ajuste entre los rodamientos y la barra de soporte de los motores, lo cual puede introducir ruido durante la validación de estrategias de control para los grados de libertad *Pitch* y *Roll*, Debido a esto se deben rectificar las medidas de la barra de soporte de los motores para dar el ajuste necesario y anular estas vibraciones.

### **3.4 Validación de la electrónica y prueba de control de altura**

En cuanto a la validación de la estrategia de control PID de altura implementada, luego de realizar la sintonización manual de las constantes de control, fue posible obtener un comportamiento estable del multirroto con un bajo error en estado estacionario alrededor del setpoint determinado, sin embargo el sistema presentó un gran sobre impulso, el cual se hacía aun mayor mientras el valor de altura asignado al setpoint era más alto. Adicionalmente, durante las pruebas se pudo ver también que al utilizar estas constantes de control, al sistema no le era posible estabilizarse en el setpoint definido luego de sufrir grandes perturbaciones.

Al implementar la herramienta de control Anti-Windup, además de evitar la saturación de los motores se pudieron solucionar problemas como el sobre impulso y las estabilización en el setpoint luego de grandes perturbaciones.

Aun así luego de observar la inestabilidad y la sensibilidad de este sistema, para la realización de un control más complejo y que involucre más grados de libertad del multirroto, se recomienda en lugar de realizar una sintonización manual, aplicar una estrategia de control basada en el modelo matemático del sistema la cual es más compleja pero puede ejercer un control más efectivo.

## **4. CONCLUSIONES**

- Para obtener un buen comportamiento y un movimiento libre al utilizar un mecanismo de barras paralelas, es de gran importancia garantizar el paralelismo de las guías, de lo contrario el mecanismo presentará resistencia al movimiento.
- La implementación de los rodamientos lineales en los bujes de nylon del mecanismo de desplazamiento vertical, hace posible obtener una reducción significativa en la fricción del sistema, aunque puede aumentar el peso del mecanismo y en consecuencia el consumo de potencia de los motores.
- Para la medición de distancias, el sensor de ultrasonido puede presentar un mejor comportamiento que el sensor infrarrojo debido a su mejor precisión y menor ruido en sus mediciones, aunque se debe tener cuidado con su cono de medición para evitar interferencias entre el sensor y el objeto a medir.
- Para pruebas de control simples, las cuales involucren uno o dos grados de libertad del multirrotor, una sintonización manual del control PID puede dar un buen resultado, sin embargo para un control más complejo y de más grados de libertad se pueden lograr mejores resultados a partir de una estrategia de control basada en el modelo matemático del sistema.
- La herramienta Anti-Windup utilizada en la estrategia de control PID de altura del multirrotor permite obtener un mejor comportamiento del sistema con menores sobre impulsos y evitando la saturación de los actuadores.



- A partir de la metodología utilizada, se obtuvo un banco de pruebas el cual a diferencia de los mencionados en el estado del arte permite utilizar distintos vehículos de acuerdo a las necesidades del usuario, permitiéndole probar diferentes tipos de equipos ya sea comerciales o contruidos durante un proyecto particular.
- La maya utilizada como protección contra piezas proyectadas no presenta un buen desempeño ya que las hélices de los multirrotores debido a sus bordes afilados pueden generar perforaciones en ésta.
- El mecanismo utilizado para el desplazamiento vertical del multirrotor permite también la realización de caracterizaciones para diferentes motores y hélices por medio de una balanza ubicada en la parte inferior del banco de pruebas.

## **5. TRABAJO FUTURO**

Ya que la mayoría de los multirrotores poseen seis grados de libertad y este banco solo permite realizar pruebas de actitud y desplazamiento para cinco de estos seis, es posible realizar algunas modificaciones al banco con el fin de permitir al usuario realizar pruebas de todos los grados de libertad de su multirrotor.

Una de estas modificaciones posibles, sería adicionar una rótula o un par universal el cual podría fijarse en la barra de soporte de los motores y a este sistema se fijaría el multirrotor. Por medio de esta configuración podrían realizarse pruebas para la totalidad de los grados de libertad del multirrotor de manera individual, como también pruebas de desplazamiento horizontal o vertical, Pitch/Roll y Yaw de forma simultánea. Esto le permite al usuario tener una mejor comprensión acerca del comportamiento del multirrotor en un vuelo libre.

Es importante también, implementar un mecanismo de guiado para los cables de alimentación y señal de los motores ya que estos pueden ser alcanzados por las hélices generando daños en el sistema y posibles accidentes.

Además de esto, podría también optimizarse al algoritmo de control PID implementado ya sea mediante una nueva sintonización de las constantes de control o desarrollando una nueva estrategia de control de otro tipo o basada en el modelo matemático del sistema, ya que esto le permite a los usuarios generar acciones de control más complejas y obtener un mayor acercamiento al sistema real.

# ANEXO 1 – PDS

## ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO – BANCO DE PRUEBAS

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD	INTERPRETACIÓN COMO UNA ESPECIFICACIÓN DE DISEÑO	VARIABLE	UNIDAD	VALOR	PRIORIDAD	Fuente de donde sale la especificación	Herramienta de medición
Función	Hacer pruebas de control de un multirrotor.	Realizar pruebas de control de desplazamiento y actitud para los 6 grados de libertad de un multirrotor.	Grados de libertad	Numero	6	Demanda	Grupo de Diseño	Conteo
	Se debe poder realizar diferentes pruebas en el banco.	El banco debe permitir diferentes configuraciones para realizar pruebas de los diferentes grados de libertad del multirrotor.	Cantidad de pruebas diferentes	Numero	12	Demanda	Grupo de Diseño	Conteo
	Se deben poder realizar pruebas de algoritmos de control.	El banco debe tener la sensórica necesaria para la retroalimentación de los algoritmos de control.	Sensores implementados	Numero	3	Demanda	Grupo de Diseño	Conteo
Contexto (Ambiente)	El banco debe ser fácil de usar.	El banco de pruebas debe ser de fácil uso para el usuario.	Tiempo para realizar las pruebas	Minutos	10 minutos	Demanda	Usuario	Cronometro

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD	INTERPRETACIÓN COMO UNA ESPECIFICACIÓN DE DISEÑO	VARIABLE	UNIDAD	VALOR	PRIORIDAD	Fuente de donde sale la especificación	Herramienta de medición
Seguridad	Que no vaya a salir nada volando.	Evitar piezas proyectadas del banco de pruebas.	Piezas proyectadas	Numero	0	Demanda	Usuario	Conteo
	Que no me vaya a cortar.	Se deben evitar aristas vivas.	Radio de Redondeo	mm	>5	Demanda	Usuario	Calibrador / Galga
	Que no se vaya a quemar el quipo.	Deben existir protecciones contra sobrecargas eléctricas.	Cantidad de protecciones	Numero	>1	Demanda	Grupo de Diseño	Conteo
	Si tengo un error de control que no se dañe el equipo.	El banco debe tener protecciones para el equipo en caso de un error de control.	Cantidad de protecciones	Numero	3	Demanda	Grupo de Diseño	Conteo
Desempeño	Que lo pueda conectar a una fuente de 12 voltios.	La electrónica del banco poder ser alimentada por medio de una batería de 3 celdas para vehículos de radiocontrol.	Voltaje	Voltios	11.7	Deseo	Grupo de Diseño	Voltímetro
	Los motores deben levantar un multirrotor.	Los motores deben ejercer fuerza suficiente para sustentar un multirrotor.	Fuerza	Newton	19	Deseo	Grupo de Diseño	Dinamómetro / Balanza
Peso	Que pueda mover el banco solo o con ayuda de otra persona.	El peso del banco no debe superar el peso permitido para ser levantado por una persona.	Masa	Kilogramos	15	Demanda	Usuario	Balanza

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD	INTERPRETACIÓN COMO UNA ESPECIFICACIÓN DE DISEÑO	VARIABLE	UNIDAD	VALOR	PRIORIDAD	Fuente de donde sale la especificación	Herramienta de medición
Materiales	Que no se oxide.	El banco debe estar construido a partir de materiales inoxidables.	Corrosión	SI / NO	NO	Demanda	Grupo de Diseño	Visual
Estética	El banco debe ser presentable para tenerlo en el laboratorio de la universidad.	El banco debe tener buenos acabados y su diseño debe ir acorde con el laboratorio de mecatrónico de la Universidad EAFIT.	Adimensional	Subjetivo	N/A	Deseo	Grupo de Diseño	Visual
Costo del producto	El banco no puede ser muy costoso.	El valor de los materiales y la construcción del banco no debe ser muy elevado.	Costo	Pesos	2'000.000	Demanda	Usuario	Conteo
Dimensiones	El banco debe ser fácil de almacenar y transportar y debe ser pequeño.	El banco de pruebas debe tener un volumen que facilite su almacenamiento.	Volumen	m³	1.5	Deseo	Grupo de Diseño	Flexómetro
Documentación al término	El banco debe tener instrucciones.	El banco de pruebas debe contar con un manual de usuario para la realización de las pruebas.	Adimensional	SI / NO	SI	Demanda	Usuario	Conteo
Confiabilidad	Los resultados deben ser confiables.	El banco debe ser suficientemente robusto para obtener resultados confiables y realizar pruebas repetibles.	Adimensional	SI / NO	SI	Demanda	Grupo de Diseño	Resultado de pruebas

## ANEXO 2 - SENSOR INFRARROJO

SENSOR INFRARROJO SHARP GP2Y0A02YK.

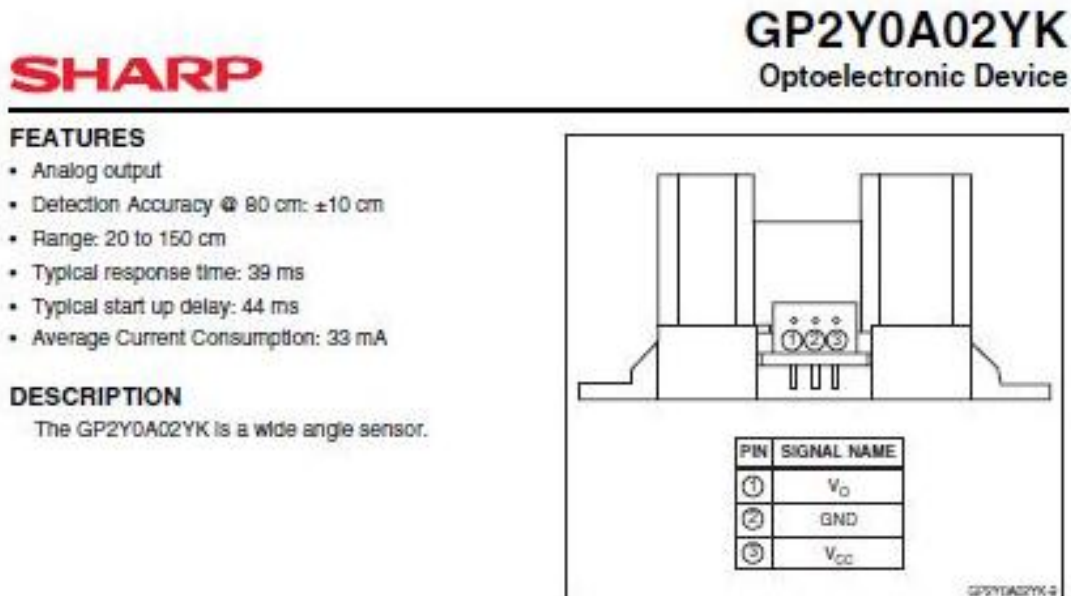


Figure 1. Pinout

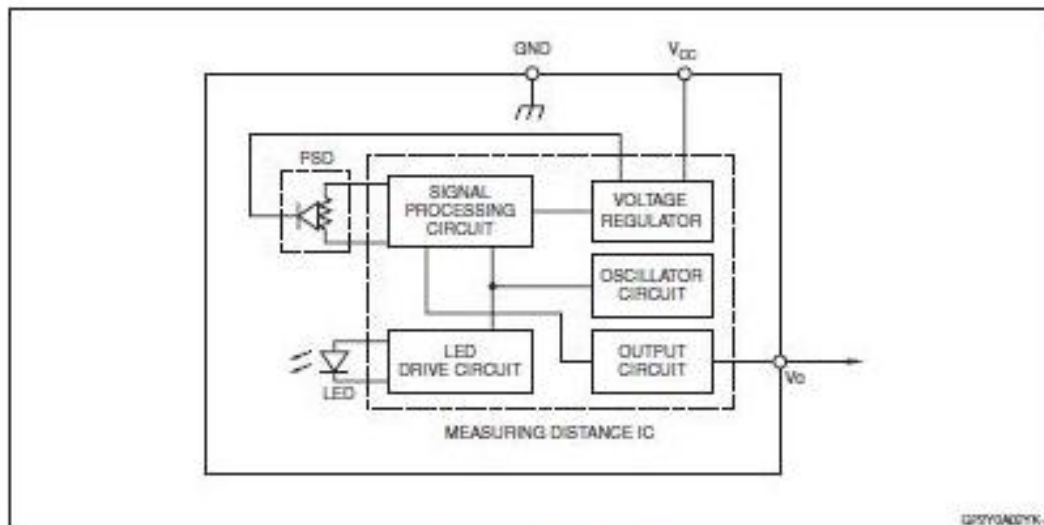


Figure 2. Block Diagram

**SHARP**

GP2Y0A02YK

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

### Absolute Maximum Ratings

$T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ VDC}$

PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
Supply Voltage	$V_{CC}$	-0.3 to +7.0	V
Output Terminal Voltage	$V_O$	-0.3 to ( $V_{CC} + 0.3$ )	V
Operating Temperature	$T_{opr}$	-10 to +60	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 to +70	$^\circ\text{C}$

### Operating Supply Voltage

PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
Operating Supply Voltage	$V_{CC}$	4.5 to 5.5	V

### Electro-optical Characteristics

$T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ VDC}$

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	NOTES
Measuring Distance Range	$\Delta L$		20	—	150	cm	1
Output Terminal Voltage	$V_O$	$L = 150\text{ cm}$	0.25	0.4	0.55	V	1
Output Voltage Difference	$\Delta V_O$	Output change at L change (150 cm – 20 cm)	1.8	2.05	2.3	V	1
Average Supply Current	$I_{CC}$	$L = 150\text{ cm}$	—	33	50	mA	1, 2

#### NOTES:

1. Measurements made with Kodak R-27 Gray Card, using the white side, (90% reflectivity).
2. L = Distance to reflective object.

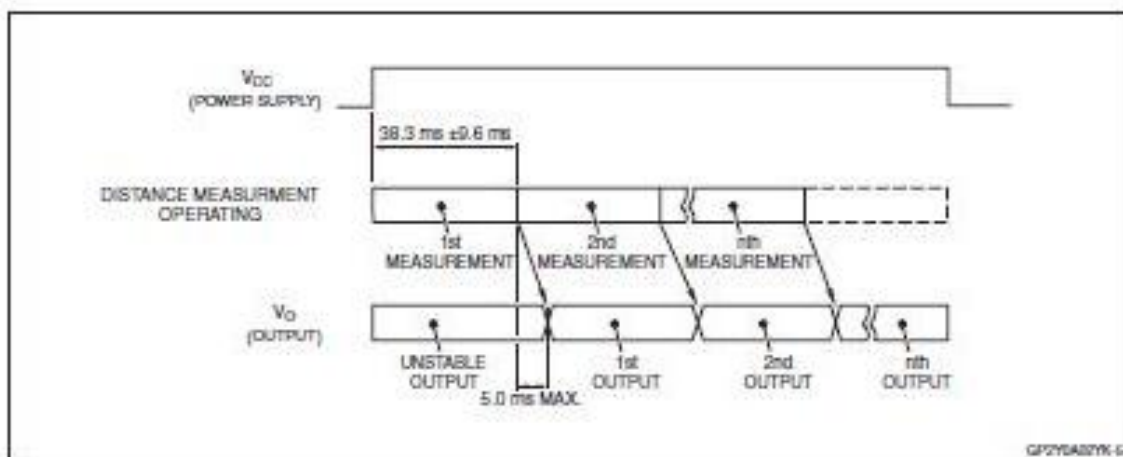


Figure 3. Timing Diagram

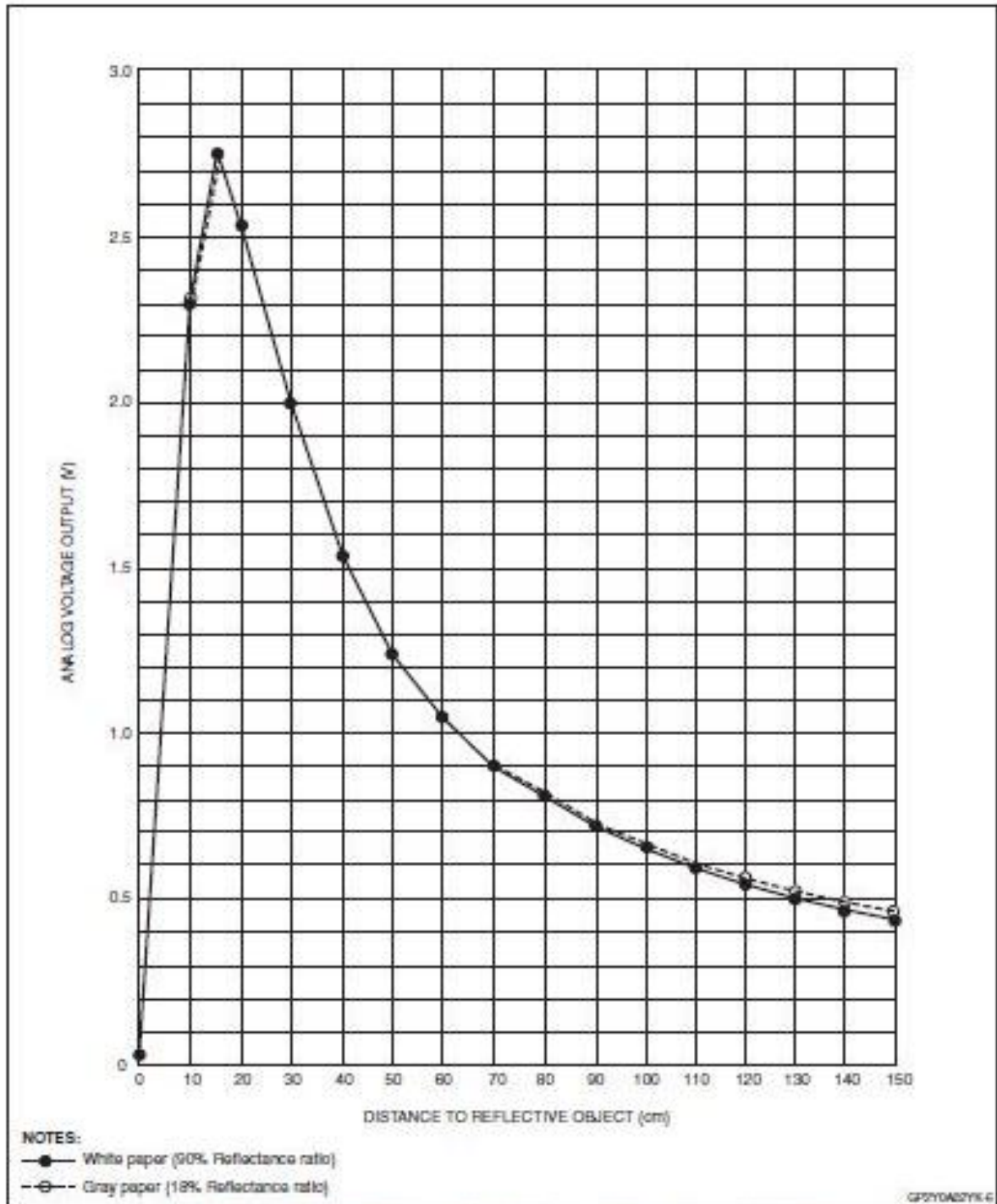


Figure 4. GP2Y0A02YK Example of Output Distance Characteristics



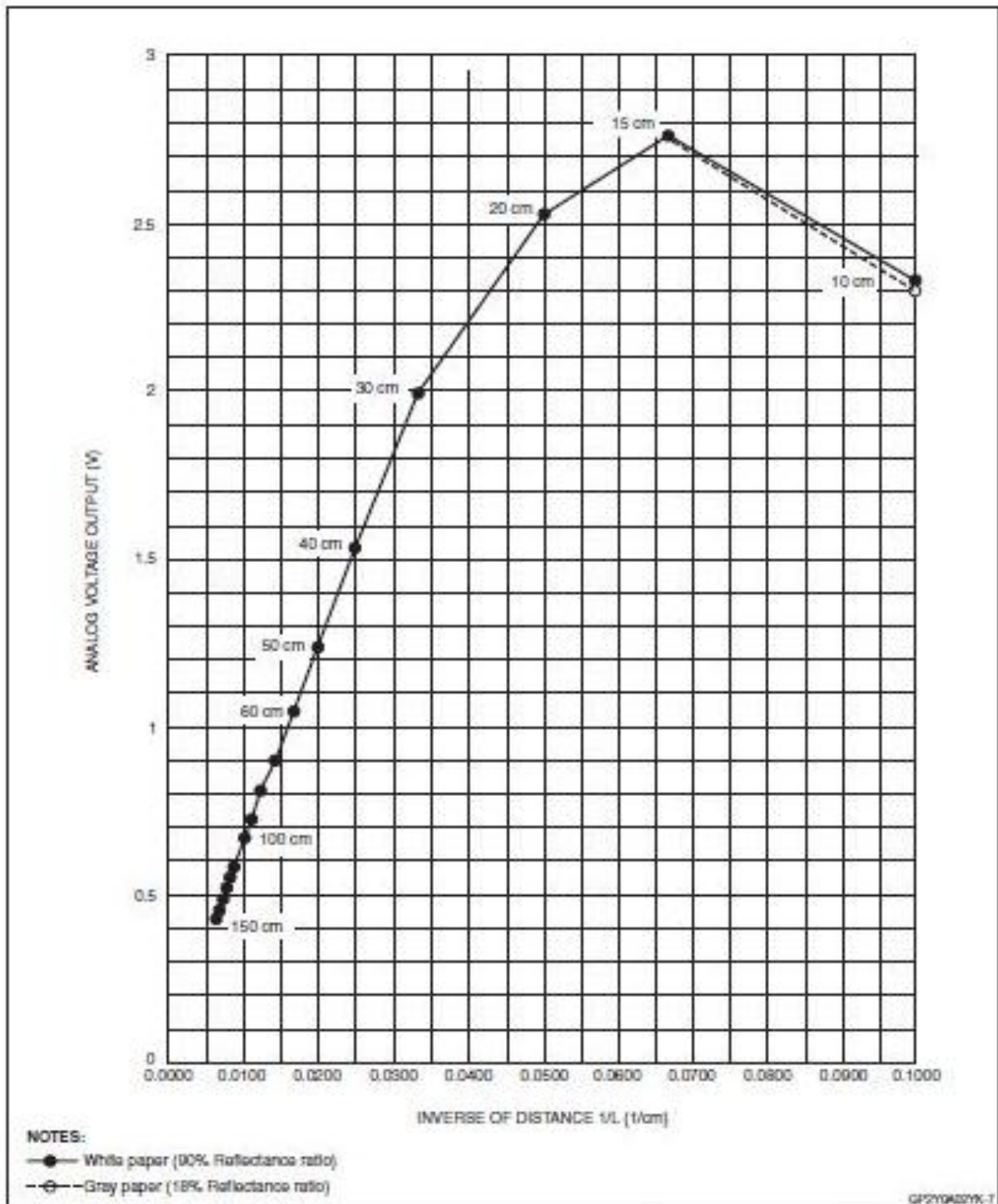


Figure 5. GP2Y0A02YK Example of Output Characteristics with Inverse Number of Distance

## ANEXO 3 – SENSOR ULTRASONIDO.

### SENSOR DE ULTRASONIDO PARALLAX PING.



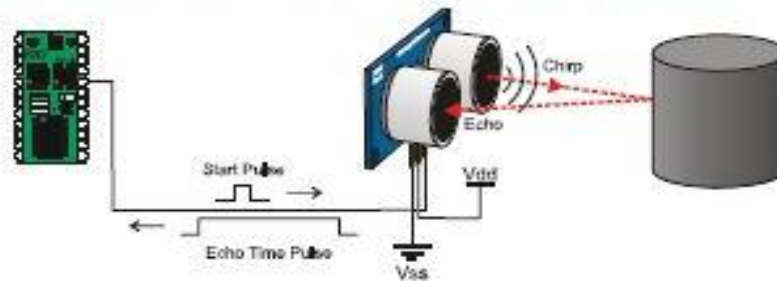
Web Site: [www.parallax.com](http://www.parallax.com)  
Forums: [forums.parallax.com](http://forums.parallax.com)  
Sales: [sales@parallax.com](mailto:sales@parallax.com)  
Technical: [support@parallax.com](mailto:support@parallax.com)

Office: (916) 624-8333  
Fax: (916) 624-8003  
Sales: (888) 512-1004  
Tech Support: (888) 997-8267

### PING))) Ultrasonic Distance Sensor (#28015)

The Parallax PING)))™ ultrasonic distance sensor provides precise, non-contact distance measurements from about 2 cm (0.8 inches) to 3 meters (3.3 yards). It is very easy to connect to microcontrollers such as the BASIC Stamp®, Propeller chip, or Arduino, requiring only one I/O pin.

The PING))) sensor works by transmitting an ultrasonic (well above human hearing range) burst and providing an output pulse that corresponds to the time required for the burst echo to return to the sensor. By measuring the echo pulse width, the distance to target can easily be calculated.



#### Features

- Range: 2 cm to 3 m (0.8 in to 3.3 yd)
- Burst indicator LED shows sensor activity
- Bidirectional TTL pulse interface on a single I/O pin can communicate with 5 V TTL or 3.3 V CMOS microcontrollers
- Input trigger: positive TTL pulse, 2  $\mu$ s min, 5  $\mu$ s typ.
- Echo pulse: positive TTL pulse, 115  $\mu$ s minimum to 18.5 ms maximum.
- RoHS Compliant

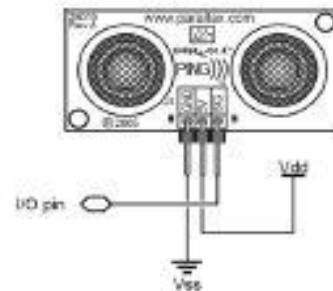
#### Key Specifications

- Supply voltage: +5 VDC
- Supply current: 30 mA typ; 35 mA max
- Communication: Positive TTL pulse
- Package: 3-pin SIP, 0.1" spacing (ground, power, signal)
- Operating temperature: 0 – 70° C.
- Size: 22 mm H x 46 mm W x 16 mm D (0.84 in x 1.8 in x 0.6 in)
- Weight: 9 g (0.32 oz)

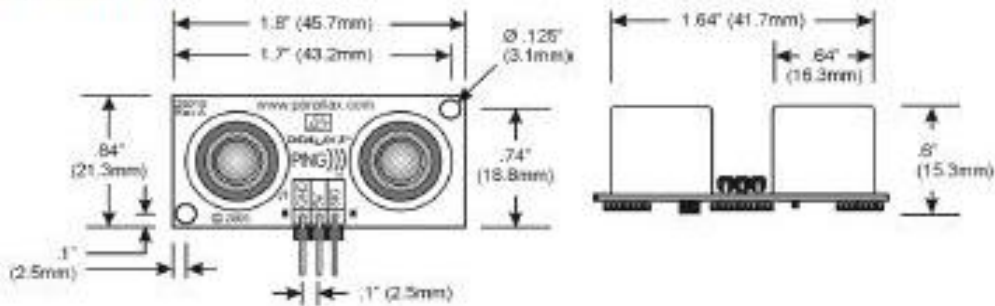
#### Pin Definitions

GND	Ground (Vss)
5 V	5 VDC (Vdd)
SIG	Signal (I/O pin)

The PING))) sensor has a male 3-pin header used to supply ground, power (+5 VDC) and signal. The header may be plugged into a directly into solderless breadboard, or into a standard 3-wire extension cable (Parallax part #800-00120).

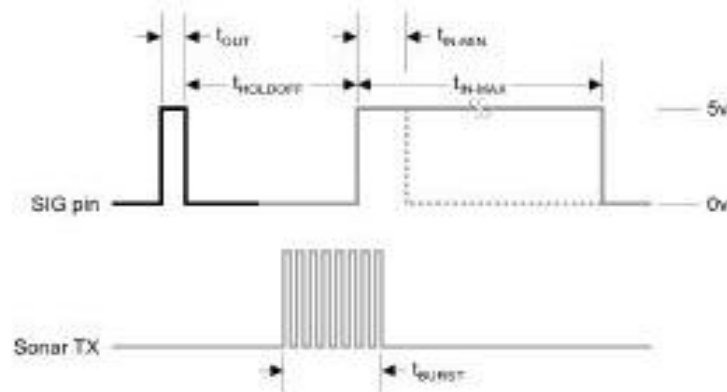


## Dimensions



## Communication Protocol

The PING))) sensor detects objects by emitting a short ultrasonic burst and then "listening" for the echo. Under control of a host microcontroller (trigger pulse), the sensor emits a short 40 kHz (ultrasonic) burst. This burst travels through the air, hits an object and then bounces back to the sensor. The PING))) sensor provides an output pulse to the host that will terminate when the echo is detected, hence the width of this pulse corresponds to the distance to the target.



Host Device	Input Trigger Pulse	$t_{OUT}$	2 $\mu$ s (min), 5 $\mu$ s typical
PING))) Sensor	Echo Holdoff	$t_{HOLDOFF}$	750 $\mu$ s
	Burst Frequency	$t_{BURST}$	200 $\mu$ s @ 40 kHz
	Echo Return Pulse Minimum	$t_{ECHO-MIN}$	115 $\mu$ s
	Echo Return Pulse Maximum	$t_{ECHO-MAX}$	18.5 ms
	Delay before next measurement		200 $\mu$ s

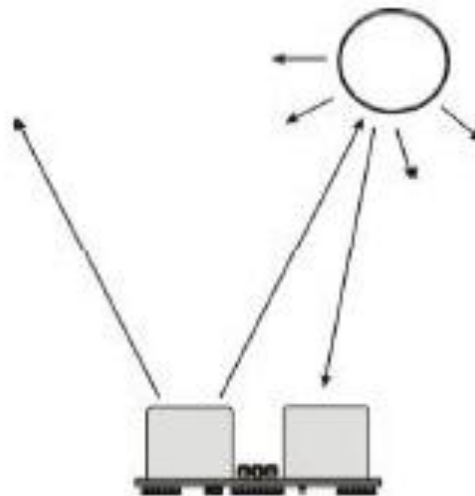
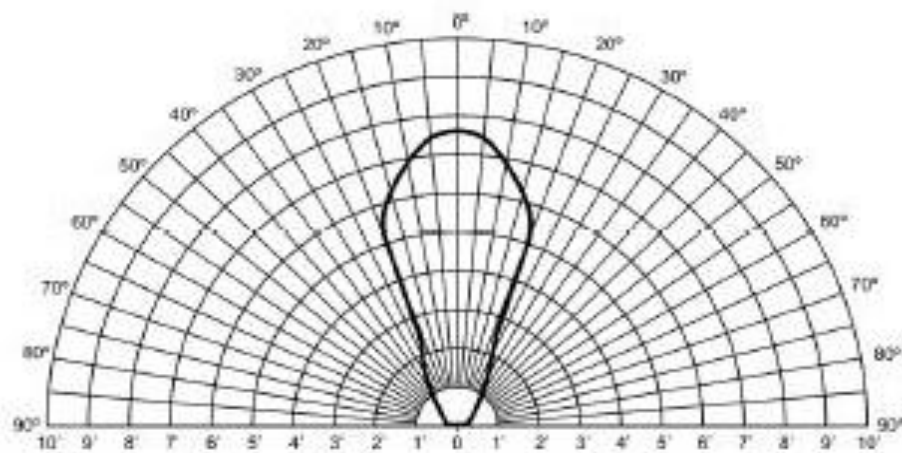
## Test Data

The test data on the following pages is based on the PING))) sensor, tested in the Parallax lab, while connected to a BASIC Stamp microcontroller module. The test surface was a linoleum floor, so the sensor was elevated to minimize floor reflections in the data. All tests were conducted at room temperature, indoors, in a protected environment. The target was always centered at the same elevation as the PING))) sensor.

### Test 1

Sensor Elevation: 40 in. (101.6 cm)

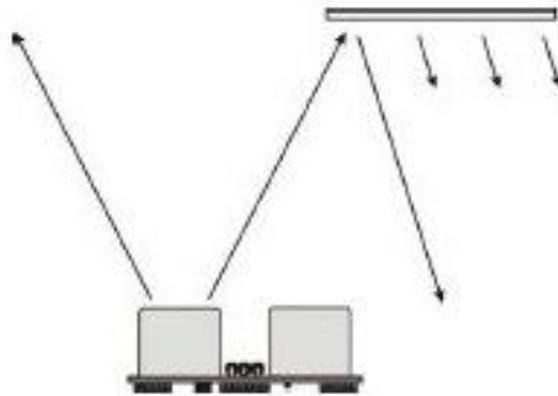
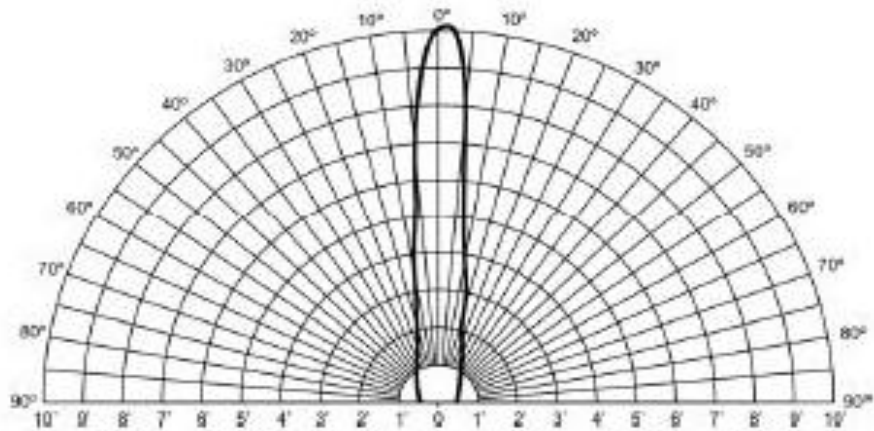
Target: 3.5 in. (8.9 cm) diameter cylinder, 4 ft. (121.9 cm) tall – vertical orientation





## Test 2

Sensor Elevation: 40 in. (101.6 cm)  
Target: 12 in. x 12 in. (30.5 cm x 30.5 cm) cardboard, mounted on 1 in. (2.5 cm) pole  
Target positioned parallel to backplane of sensor



## ANEXO 4 – IMU.

### UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL ArduIMU V3.

#### 6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>ACCELEROMETER SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>ZERO-G OUTPUT</b>						
Initial Calibration Tolerance <sup>1</sup>	X and Y axes		±50		mg	
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
<b>SELF TEST RESPONSE</b>			0.5		g	
<b>NOISE PERFORMANCE</b>						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>	Programmable Range	5		260	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>	Programmable Range	4		1,000	Hz	
<b>INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT</b>			1		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning

## 6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>GYROSCOPE SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	FS_SEL=0 FS_SEL=1 FS_SEL=2 FS_SEL=3		±250 ±500 ±1000 ±2000		°/s °/s °/s °/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0 FS_SEL=1 FS_SEL=2 FS_SEL=3		131 65.5 32.8 16.4		LSB/(°/s) LSB/(°/s) LSB/(°/s) LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)</b>						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
<b>GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE</b>	FS_SEL=0					
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to 10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
<b>GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES</b>						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>	Programmable Range	5		256	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>	Programmable	4		8,000	Hz	
<b>GYROSCOPE START-UP TIME</b>	DLPFCFG=0					
ZRO Settling	to ±1% of Final		30		ms	

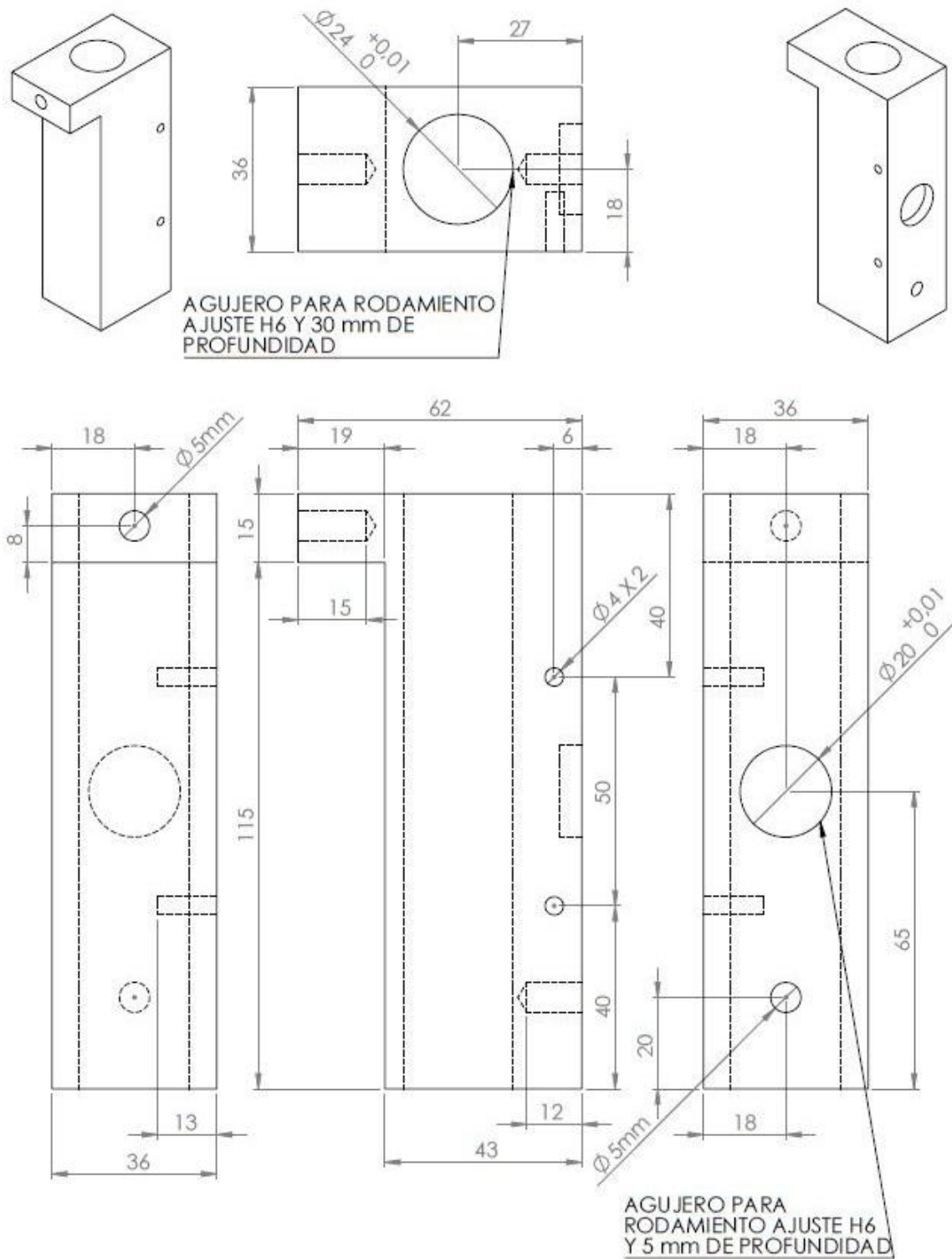
### 6.3 Electrical and Other Common Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
<b>TEMPERATURE SENSOR</b>						
Range			-40 to +85		°C	
Sensitivity	Untrimmed		340		LSB/°C	
Temperature Offset	35°C		-521		LSB	
Linearity	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		±1		°C	
<b>VDD POWER SUPPLY</b>						
Operating Voltages		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		µA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		µA	
	5 Hz update rate		20		µA	
	20 Hz update rate		60		µA	
	40 Hz update rate		110		µA	
Full-Chip Idle Mode Supply Current			5		µA	
	Power Supply Ramp Rate			100	ms	
<b>VLOGIC REFERENCE VOLTAGE</b>						
Voltage Range	MPU-6050 only	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	VLOGIC must be ≤VDD at all times			3	ms	
Normal Operating Current	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value		100		µA	
<b>START-UP TIME FOR REGISTER READ/WRITE</b>			20	100	ms	
<b>TEMPERATURE RANGE</b>						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	

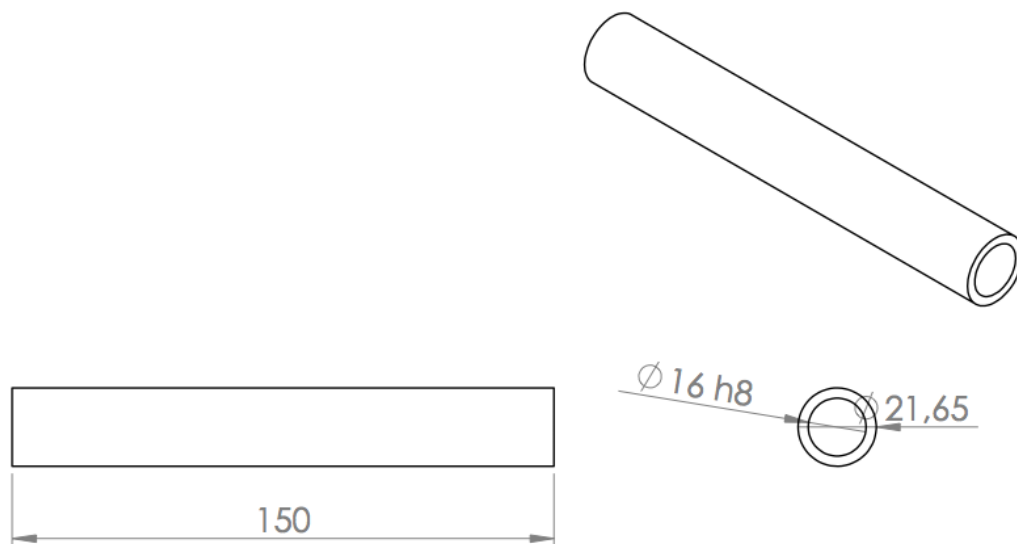


## ANEXO 5 – PLANO BUJES.



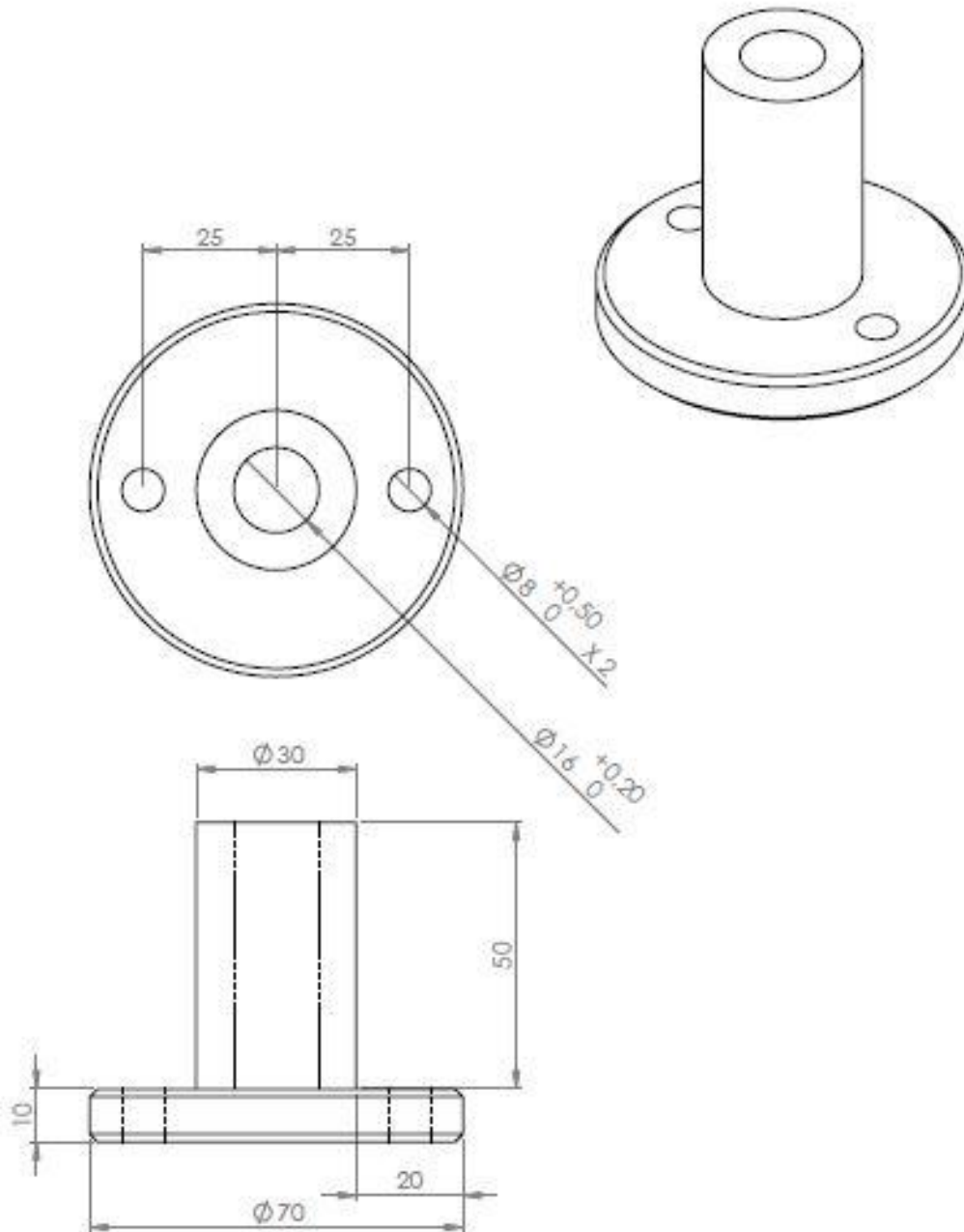
## **ANEXO 6 - PLANO.**

### **BUJES PARA PROTOTIPO PRELIMINAR**



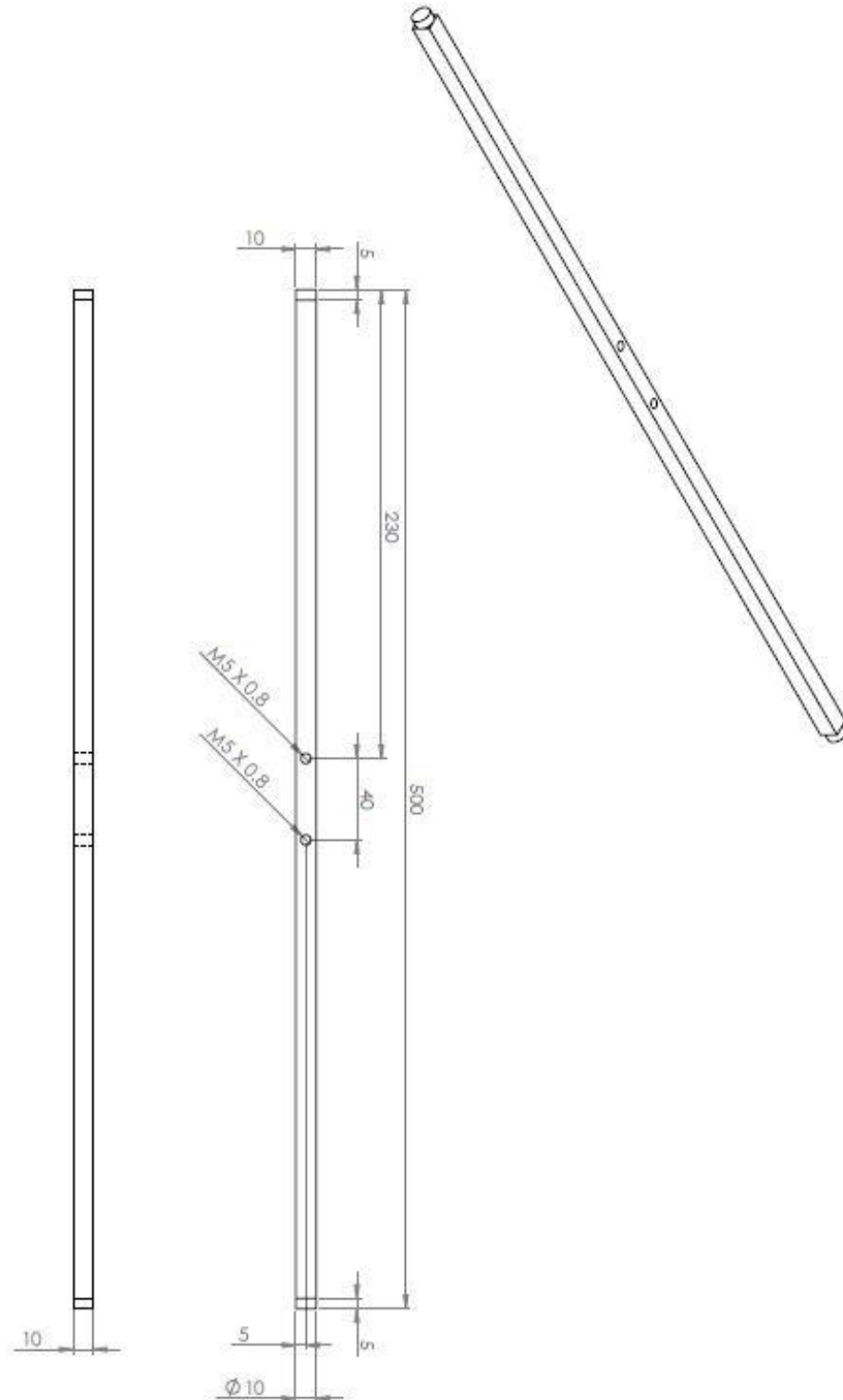
## ANEXO 7 - PLANO

### PLANO DE MANUFACTURA PARA SOPORTE DE GUIAS



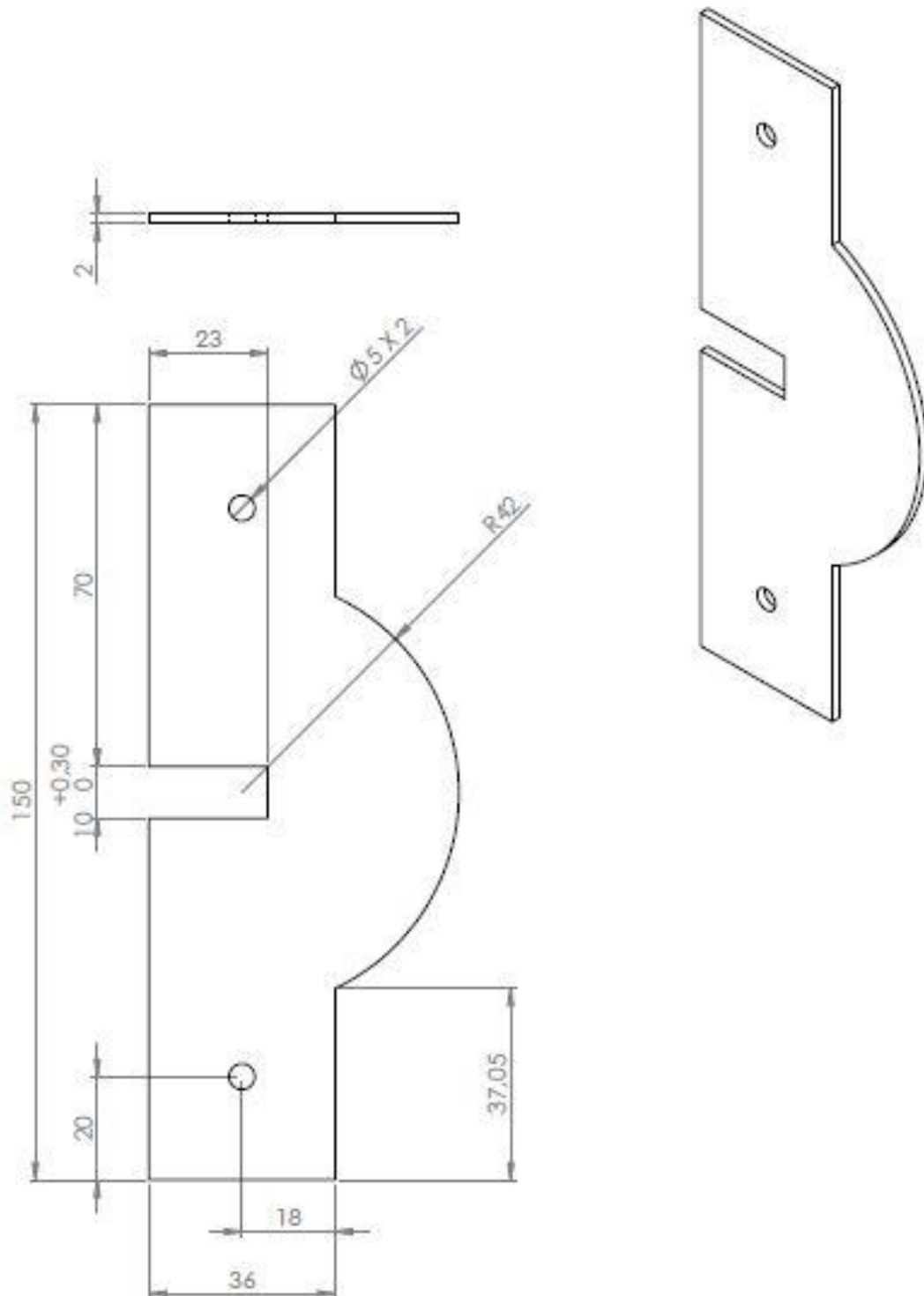
## ANEXO 8 - PLANO

### PLANO DE MANUFACTURA EJE DE ROTACIÓN



## ANEXO 9 - PLANO

### PLANO DE MANUFACTURA PLACAS DE BLOQUEO DE ROTACIÓN



## ANEXO 10

### DESCRIPCIÓN DE PARTES COMERCIALES UTILIZADAS

LISTA DE PARTES COMERCIALES			
Descripción	Marca	Referencia	Cantidad
Perfilería de aluminio de 0.8 m para bastidor superior e inferior	MICRO	0.500.66.0.800	8
Perfilería de aluminio de 1.4 m para estructura del banco de pruebas	MICRO	0.500.66.1.400	4
Perfilería de aluminio de 0.755 m para soporte de guías paralelas	MICRO	0.500.66.0.755	2
Tornillos cabeza de martillo M8 x 30 para soportes de guías paralelas	MICRO	0.500.001.132	8
Tornillos cabeza de martillo M8 x 20 para ángulos de ensamble	MICRO	0.500.001.130	52
Tuercas M8 para tornillos cabeza de martillo	MICRO	0.500.017.836	60
Eje de acero-plata de 1.4 m de longitud y 16 mm de diámetro para guías paralelas	N/A	N/A	2
Ángulos de ensamble de 35 x 35 mm	MICRO	0.500.001.175	24
Ángulos de ensamble de 100 x 100 mm	MICRO	0.500.001.178	6
Patas para apoyo vertical y horizontal	MICRO	0.500.001.107	8
Resortes de 100 mm de longitud con constante de elasticidad (K) > 5000 N/m	N/A	N/A	4

# ANEXO 11

## ALGORITMO DE CONTROL DE ALTURA



```
slider_con_sensor_y_pid | Arduino 1.0.5

slider_con_sensor_y_pid
#include <genieArduino.h>

#include <Servo.h>

const int pingPin = 37; // pin digital al que se conecta el sensr de ultrasonido

// variables para la posicion
long duration;
long cm;
// constantes PID
unsigned long lastTime;
double Output, Setpoint;
double errSum = 0;
double lastErr = 0;
float error = 0;

double kp = 1.1;
double ki = 0.0008;
double kd = 0.8;

// otras variables
int salidatotal = 0;

Servo motor;
//
// variable para la posicion del slider
int slider_val = 0;

Genie genie;
#define RESETLINE 4 // Change this if you are not using an Arduino Adaptor Shield Version 2 (see code below)
void setup()
{
  // NOTE, the genieBegin function (e.g. genieBegin(GENIE_SERIAL_0, 115200)) no longer exists. Use a Serial Begin and serial port of your choice in
  // your code and use the genie.Begin function to send it to the Genie library (see this example below)
  // 200K Baud is good for most Arduinos. Galileo should use 115200.

  // 200K Baud is good for most Arduinos. Galileo should use 115200.
  Serial.begin(9600); // Serial0 @ 9600 Baud
  genie.Begin(Serial); // Use Serial0 for talking to the Genie Library, and to the 4D Systems display

  genie.AttachEventHandler(myGenieEventHandler); // Attach the user function Event Handler for processing events

  // Reset the Display (change D4 to D2 if you have original 4D Arduino Adaptor)
  // THIS IS IMPORTANT AND CAN PREVENT OUT OF SYNC ISSUES, SLOW SPEED RESPONSE ETC
  // If NOT using a 4D Arduino Adaptor, digitalWrite must be reversed as Display Reset is Active Low, and
  // the 4D Arduino Adaptors invert this signal so must be Active High.

  pinMode(RESETLINE, OUTPUT); // Set D4 on Arduino to Output (4D Arduino Adaptor V2 - Display Reset)
  digitalWrite(RESETLINE, 1); // Reset the Display via D4
  delay(100);
  digitalWrite(RESETLINE, 0); // unReset the Display via D4

  delay (3500); //let the display start up after the reset (This is important)

  //Turn the Display on (Contrast) - (Not needed but illustrates how)
  genie.WriteContrast(1); // 1 = Display ON, 0 = Display OFF.
  //For uLCD43, uLCD-70DT, and uLCD-35DT, use 0-15 for Brightness Control, where 0 = Display OFF, though to 15 = Max Brightness ON.

  // inicializar el speed controller y el motor

  motor.attach(4); //el pin al que se conecta la salida de señal servo que va al speed controller es el 4 (analógico)

  motor.write(16); // manda una señal de servo de 16, experimentalmente se determino que esta es la necesesaria para inicializarlo

  delay (3000); // tiempo para que se procese la señal de inicio
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
long microsecondsToCentimeters(long microseconds) // esta funcion se utiliza para calcular la posicion con el sensor de ultrasonido
{
    // The speed of sound is 340 m/s or 29 microseconds per centimeter.
    // The ping travels out and back, so to find the distance of the
    // object we take half of the distance travelled.
    return microseconds / 29 / 2;
}

////////////////////////////////////

double Compute() // Esta funcion permite implementar un control PID al calcular la salida para retroalimentar el sistema segun las constantes kp, ki y kd
{
    /*How long since we last calculated*/
    unsigned long now = millis();
    double timeChange = (double)(now - lastTime);

    /*Compute all the working error variables*/
    error = (Setpoint - cm);
    if (Output < 85) { // control "anti windup"
        errSum += (error * timeChange);
    }

    double dErr = (error - lastErr) / timeChange;

    /*Compute PID Output*/
    Output = (kp * error) + (ki * errSum) + (kd * dErr);

    /*Remember some variables for next time*/
    lastErr = error;
    lastTime = now;
}

void loop()
{
    // ...

    genie.DoEvents(); // This calls the library each loop to process the queued responses from the display

    //////////////////////////////////////

    // se debe calcular la posicion con el sensor de ultrasonido

    // establish variables for duration of the ping,
    // and the distance result in inches and centimeters:

    // The PING))) is triggered by a HIGH pulse of 2 or more microseconds.
    // Give a short LOW pulse beforehand to ensure a clean HIGH pulse:
    pinMode(pingPin, OUTPUT);
    digitalWrite(pingPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(pingPin, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(pingPin, LOW);

    // The same pin is used to read the signal from the PING))) a HIGH
    // pulse whose duration is the time (in microseconds) from the sending
    // of the ping to the reception of its echo off of an object.
    pinMode(pingPin, INPUT);
    duration = pulseIn(pingPin, HIGH);

    // convert the time into a distance

    cm = microsecondsToCentimeters(duration); // esta es la distancia en cm del dron al sensor de ultrasonido

    //////////////////////////////////////
```



```
genie.WriteObject(25, 0x00, slider_val); // mandar al scope el valor del slider, que corresponde al set point
////////////////////////////////////
genie.WriteObject(25, 0x00, cm); // mandar al scope el valor de la posicion
Setpoint = slider_val; //el setpoint para efectos del procesamiento de control se hace igual al valor del slider
////////////////////////////////////
// Despues de hacer el procesamiento se obtiene la variable Output que es la accion de control tras sumar las componentes proporcional, integral y derivativa
Compute();
Output = Output / 300; //El valor maximo de error para este sistema hace que Output varie entre 0 y 300. Por lo que Output se escala a un porcentaje dividiendo entre 300
Output = Output *100; //Experimentalmente se determino que para el sistema, el valor maximo de salida de servo con que varia la potencia del motor es 135.
// luego de las ultimas 2 operaciones, Output corresponde a un porcentaje de la salida admisible del servo.
// ahora el rango de salida del servo se limita entre 42 y 65 pues experimentalmente se evidencio una respuesta suficientemente rapida con estos limites y que es mas segura para los ensayos.
if (Output < 56)
{
    Output = 56;
}
if (Output > 85)
{
    Output = 85;
}
motor.write(Output); //por ultimo se le escribe al servo la señal deseada limitada

// Aca se indican que eventos del display tienen algun efecto sobre el sistema
void myGenieEventHandler(void)
{
    genieFrame Event;
    genie.DequeueEvent(&Event);

    //////////////////////////////////////

    // Slider de Set Point

    //If the cmd received is from a Reported Event (Events triggered from the Events tab of Workshop4 objects)
    if (Event.reportObject.cmd == GENIE_REPORT_EVENT)
    {
        if (Event.reportObject.object == GENIE_OBJ_SLIDER) // If the Reported Message was from a Slider
        {
            if (Event.reportObject.index == 0) // If Slider0
            {
                slider_val = genie.GetEventData(&Event); // Receive the event data from the Slider0
                genie.WriteObject(GENIE_OBJ_LED_DIGITS, 0x00, slider_val); // Write Slider0 value to LED Digits 0
            }
        }
    }

    //////////////////////////////////////

    // Slider de kp

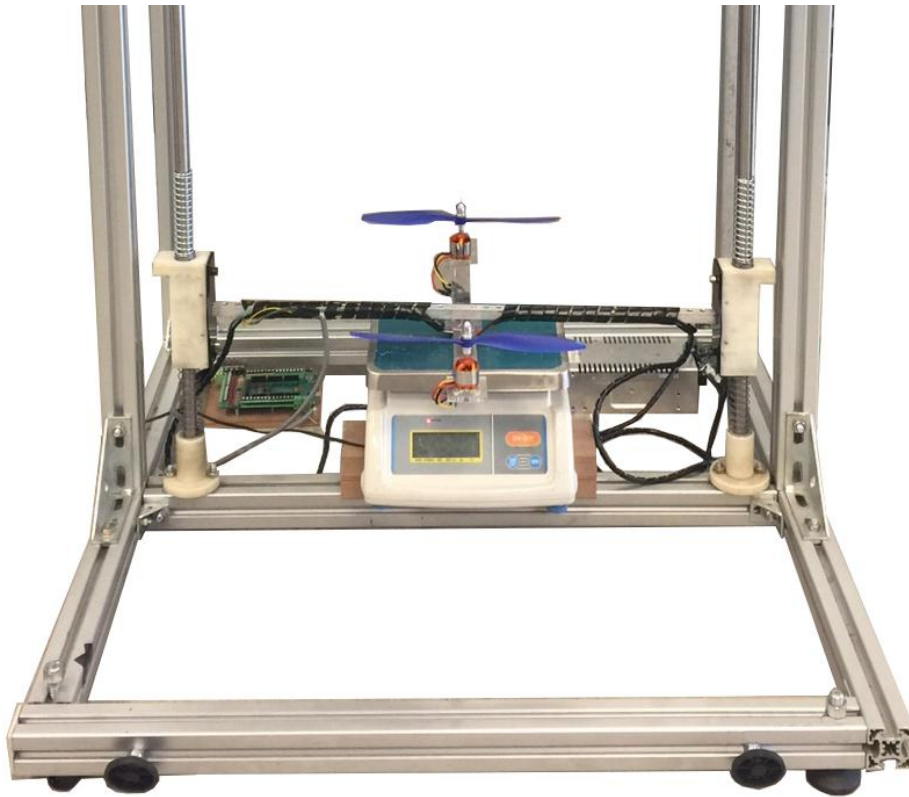
    if (Event.reportObject.cmd == GENIE_REPORT_EVENT)
    {
        if (Event.reportObject.object == GENIE_OBJ_SLIDER) // If the Reported Message was from a Slider
        {
            if (Event.reportObject.index == 1) // If Slider1
            {
                kp = genie.GetEventData(&Event); // Receive the event data from the Slider1

                if (Event.reportObject.index == 3) // If Slider3
                {
                    kd = genie.GetEventData(&Event); // Receive the event data from the Slider3
                    genie.WriteObject(GENIE_OBJ_LED_DIGITS, 0x03, kd); // Write Slider0 value to LED Digits 3
                    kd = kd / 10; // para visualizar en led es 10 veces el valor de la constante por tener un decimal, al
                    //determinar la onstante dividimos lo que va en el display sobre 10
                }
            }
        }
    }
}
```

## **ANEXO 12**

### **CARACTERIZACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE DEL MULTIRROTOR**

Una vez construido el prototipo, se realizó una caracterización de la fuerza de propulsión generada por los motores del multirrotor en función de la señal de servo emitida por el microcontrolador.

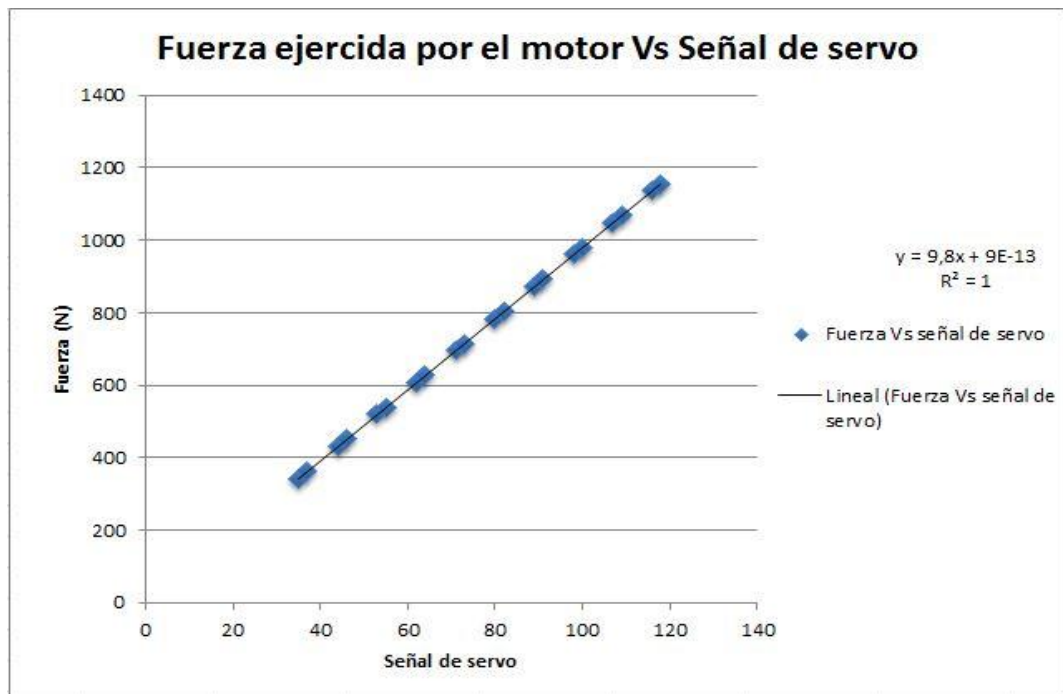


**Figura 49. Caracterización de motores.**

Como se observa en la Figura 49, la medición de la fuerza ejercida por los motores se realizó por medio de una balanza.

Para esto se apoyó el multirrotor sobre una balanza y se invirtió el sentido de giro de los motores con el fin de generar una fuerza de empuje descendente sobre la balanza en lugar de ascendente como lo hacen normalmente.

Así, a partir de los valores en gramos indicados por la balanza es posible conocer la fuerza ejercida por el multirrotor en función de la señal de servo que estos reciben.



**Figura 50. Fuerza de arrastre generada en función de la señal de servo.**

En la Figura 50 se puede observar una gráfica de los datos de fuerza generada por el conjunto motor-hélice mediante la variación de la señal de servo entregada a los motores. Para esta adquisición de datos se utilizaron dos motores Turnigy 2836/8 y una hélice de 10 pulgadas de diámetro y paso de 4.5 (10 x 4.5).

En esta gráfica se observa un alto coeficiente de correlación lineal, lo cual demuestra una relación lineal entre la fuerza de empuje generada y la señal de

servo de entrada al motor. Esto puede facilitar la estimación de parámetros para el modelo matemático y la implementación de la estrategia de control.

## BIBLIOGRAFÍA

Angel, M. (19 de Junio de 2012). *itsm*. Obtenido de <http://homepage.cem.itesm.mx/marios/pdfs/Definicionesbasicas.pdf>

Arduino. (12 de Mayo de 2015). *Arduino*. Recuperado el 12 de Mayo de 2015, de <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>

Armando Isaac Aguilar A., A. C. (2013). *Diseño y manufactura de una banco de pruebas para estimar la fuerza de tracción en hélices y rotores con aplicaciones a mini-aeronaves*. Mexico D.F.

Beitz, W. (1996). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Design Council.

Departamento de defensa EEUU. (14 de Abril de 2013). *Geoeconomía*. Recuperado el 1 de Junio de 2015, de [http://fas.org/irp/program/collect/uav\\_roadmap2005.pdf](http://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf)

DJI. (11 de Agosto de 2015). *dji*. Obtenido de <http://www.dji.com/product/phantom/feature>

DJI. (2015). *DJI the future of possible*. Recuperado el 07 de Marzo de 2015, de <http://www.dji.com/product/inspire-1>

Ecured. (Marzo de 2015). *Ecured*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de [http://www.ecured.cu/index.php/Veh%C3%ADculo\\_a%C3%A9reo\\_no\\_tripulado](http://www.ecured.cu/index.php/Veh%C3%ADculo_a%C3%A9reo_no_tripulado)

Electrónica RC. (13 de Agosto de 2015). *electrónica RC*. Obtenido de [http://electronicarc.com/catalogo/product\\_info.php?products\\_id=909](http://electronicarc.com/catalogo/product_info.php?products_id=909)

Gómez, F. J. (21 de Julio de 2013). *Youtube*. Recuperado el 09 de Marzo de 2015, de <https://www.youtube.com/watch?v=089Jwap0Fek>

Grau, J. J. (2012). *Testing Bench Design and Tilting Propeller System Identification for the Development and Control of a Thrust-vectoring Hovercraft*. Rapid City.

Guerrero Ochoa, R. C., & Coronel Arízaga, F. X. (Diciembre de 2013). *ups*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5563/1/UPS-CT002783.pdf>

King, H. (18 de Junio de 2015). *Hobby King*. Recuperado el 18 de Junio de 2015, de [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_18969\\_\\_Turnigy\\_D2836\\_8\\_1100KV\\_Brushless\\_Outrunner\\_Motor.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18969__Turnigy_D2836_8_1100KV_Brushless_Outrunner_Motor.html)

Magazine, M. (17 de Junio de 2015). *Master Magazine*. Recuperado el 17 de Junio de 2015, de <http://www.mastermagazine.info/termino/6361.php>

Mead, D. (04 de Marzo de 2014). *MOTHERBOARD*. Recuperado el 27 de Mayo de 2015, de <http://motherboard.vice.com/read/the-militarys-2015-budget-features-more-money-for-new-drones>

Mesa Tabares, A. (2014). *DISEÑO Y DESARROLLO DE UN BANCO DE PRUEBAS DE VEHÍCULOS AÉREOS*. Medellin.

Montgomery, K. (21 de Agosto de 2014). *Learn Parallax*. Obtenido de <http://learn.parallax.com/multicopter-flying-guide/learn-your-transmitter-controls>

Norton, R. L. (1999). *DESIGN OF MACHINERY* (2 ed.). Worcester, Massachusetts, Estados Unidos De America: McGraw-Hill.

Parallax. (2015). *Parallax*. Recuperado el 28 de Marzo de 2015, de <https://www.parallax.com/product/28015>

Parrot. (11 de Agosto de 2015). *ardrone2*. Obtenido de <http://ardrone2.parrot.com/>

- Piovan, M. T. (2014). *utn*. Obtenido de <http://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/images/carreras/elementosdemaquinas/cap02-01.pdf>
- Precision, B. (2015). *BK Precision*. Recuperado el 2015 de Marzo de 28, de <http://www.bkprecision.com/products/power-supplies/1790-high-current-linear-dc-power-supply-0-32v-20a-led.html>
- Quanser Inc. (2015). *Quanser*. Recuperado el 03 de Marzo de 2015, de [http://www.quanser.com/Products/3dof\\_hover](http://www.quanser.com/Products/3dof_hover)
- RedTwenty. (25 de Agosto de 2014). *Red20RC*. Recuperado el 7 de Julio de 2015, de <http://red20rc.org/hobbyking-q450-quadcopter/>
- Taillefer, G. I. (Julio de 2014). *Instrumentación y programación de un banco de ensayos de sistemas de propulsión para cuadricópteros*. Obtenido de <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/53cd8a7f4f583.pdf>
- The UAV. (06 de Marzo de 2015). *The UAV*. Recuperado el 06 de Marzo de 2015, de <http://www.theuav.com/>
- Vincent Abry. (3 de Mayo de 2010). *Robot Shop*. Obtenido de <http://www.robotshop.com/blog/en/sharp-range-sensors-in-stock-530>
- Wikispace. (7 de Junio de 2015). *Wikispace*. Recuperado el 7 de Junio de 2015, de <http://control-pid.wikispaces.com/>
- WIPO. (27 de Mayo de 2015). *WIPO Patent Scope*. Recuperado el 27 de Mayo de 2015, de [https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?currentNavigationRow=1&prevCurrentNavigationRow=14&query=FP:\(drone%20\)&office=&sortOption=Data%20pub%20ordem%20inversa&prevFilter=&maxRec=795&viewOption=All](https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?currentNavigationRow=1&prevCurrentNavigationRow=14&query=FP:(drone%20)&office=&sortOption=Data%20pub%20ordem%20inversa&prevFilter=&maxRec=795&viewOption=All)

